

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Měření řezných sil u negativních VBD

Measurement of Cutting Forces in

Negative Inserts

Student: Jan Krejčí

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Krejčí**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Měření řezných sil u negativních VBD**
Measurement of Cutting Forces in Negative Inserts

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Metodika měření řezných sil.
3. Návrh vlastního postupu měření.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko - ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

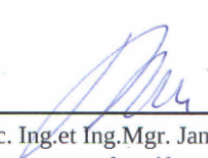
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovém obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 20. května 2019



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́доміі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 20. května 2019


.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Krejčí

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Velká Strana 163, 789 72 Dubicko

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KREJČÍ, J. Měření řezných sil u negativních VBD: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 48 s. Vedoucí práce: Vrba, V.

Bakalářská práce se zabývá řeznými silami u negativních VBD. V práci byly změřeny a mezi sebou porovnány řezné síly vybraných VBD (od společnosti Dormer Pramet s.r.o.) pomocí dynamometru KISTLER. Dále se práce zabývá obecným popisem problematiky měření řezných sil, metodikou měření řezných sil. Měření proběhlo na polotovaru oceli ČSN 12 050. Díky této práci může Dormer Pramet s.r.o. vyřadit některé VBD z jejich rozsáhlého sortimentu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KREJCI, J. *Measurement of Cutting Forces in Negative Inserts: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 48 p. Thesis head: Vrba, V.

The bachelor thesis deals with cutting forces in negative inserts. Cutting forces of selected inserts (from Dormer Pramet Ltd.) using a KISTLER dynamometer were measured and compared. The thesis also deals with general description of cutting forces measurement, and cutting force measurement methodology. Steel ČSN 12 050 was used. Thanks to this work can Dormer Pramet s.r.o. exclude some inserts from their extensive range.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
Seznam obrázků a tabulek	9
Úvod.....	11
1 Obecná charakteristika daného problému	12
1.1 Materiály pro výrobu VBD.....	12
1.2 Nepovlakované slinuté karbidy	13
1.3 Povlakované slinuté karbidy.....	16
1.4 Metody povlakování	18
1.5 Představení firmy Dormer Pramet s.r.o.	22
1.6 Teorie tvorby třísky	23
2 Metodika měření řezných sil.....	28
2.1 Řezné síly.....	28
2.2 Nepřímé měření sil a momentů.....	31
2.3 Přímé měření sil a momentů	32
2.4 Cejchování dynamometrů.....	37
3 Návrh vlastního postupu měření.....	38
3.1 Dynamometr Kistler	38
3.2 Obráběcí stroj.....	38
3.3 Ocel ČSN 12 050	39
4 Diskuze experimentů.....	40
4.1 Popis měření	40
4.2 Grafy	42
5 Technicko-ekonomické zhodnocení.....	44
6 Závěr.....	45
Seznam použité literatury:	47

Seznam použitých značek a symbolů

Značka nebo symbol	Význam	Jednotka
ČSN	- Česká technická norma.....	[-]
EN	- Evropská norma.....	[-]
VBD	- Vyměnitelná břitová destička.....	[-]
SK	- Slinuté karbidy.....	[-]
WC	- Karbid wolframu.....	[-]
TiC	- Karbid titanu.....	[-]
TaC	- Karbid tantalu.....	[-]
TiN	- Nitrid titanu.....	[-]
TiAlN	- Titan aluminium nitrid.....	[-]
DLC	- Diamantu podobné uhlíkové povlaky.....	[-]
CVD	- Chemická depozice vrstev.....	[-]
PVD	- Fyzikální depozice vrstev.....	[-]
MT-CVD	- Středně teplotní chemická depozice vrstev.....	[-]
PA-CVD	- Chemická depozice vrstev za asistence plazmatu.....	[-]
K	- Součinitel přechování třísky.....	[-]
a	- Tloušťka odebírané vrstvy.....	[mm]
a ₁	- Tloušťka třísky	[mm]
γ_n	- Úhel čela nástroje v normálové rovině	[°]
l'	- Délka odcházející třísky	mm
S	- Jmenovitá plocha průřezu třísky	[mm ²]
S-N-O	- soustava stroj – nástroj – obrobek	[-]
ε	- Intenzita plastické deformace.....	[-]
ρ	- Hustota obráběného materiálu	[g·cm ⁻³]
m ₁	- Hmotnost vzniklé třísky	[g]
KNB	- Kubický nitrid bóru.....	[-]
v _c	- Řezná rychlost.....	[m·s ⁻¹]
Φ	- Úhel stříhu.....	[°]
F	- Síla obrábění (řezání)	[N]
F ₁	- Aktivní složka síly obrábění	[N]
F _{2,p}	- Pasivní složka síly obrábění.....	[N]
F _c	- Řezná složka síly obrábění	[N]

F_f	- Posuvová složka síly obrábění[N]
F_n	- Normálová síla[N]
F_{ok}	- Okamžitá síla[N]
R	- Řezný odpor[N]
κ_r	- Úhel nastavení hlavního ostří[°]
a_p	- Hloubka řezu[mm]
x^{Fc}	- Exponent pro výpočet řezné síly[-]
y^{Fc}	- Exponent pro výpočet řezné síly[-]
$P_{už}$	- Užitečný výkon při obrábění[W]
P_o	- Výkon nezatíženého obráběcího stroje[W]
P_c	- Celkový výkon obráběcího stroje[W]
M_k	- Točivý moment od tangenciální složky síly obrábění[N·m]
M_{kb}	- Točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou[N·m]

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1.1 - Aktuální využití nástrojových materiálů. ³	12
Obrázek 1.2 - Vlastnosti nástrojových materiálů. ⁴	13
Obrázek 1.3 - Grafy využití práškové metalurgie po celém světě. ⁷	13
Obrázek 1.4 - Tabulka značení SK. ⁵	14
Obrázek 1.5 - Zobrazení slinutých karbidů typu P. ⁸	15
Obrázek 1.6 - Zobrazení slinutých karbidů typu M. ⁸	15
Obrázek 1.7 - Porovnání hrubozrnných a jemnozrnných slinutých karbidů typu K. ⁸	16
Obrázek 1.8 - Rotační držáky nástrojů pro PVD povlakování. ⁹	18
Obrázek 1.9 - Mikrostruktura PVD povlaku. ¹¹	20
Obrázek 1.10 - Schéma CVD povlakovacího zařízení. ¹³	21
Obrázek 1.11 - CVD povlak vlevo a MT-CVD povlak vpravo. ¹¹	22
Obrázek 1.12 - Sortiment firmy Dormer Pramet s.r.o. ¹	23
Obrázek 1.13 - Vznik třísky. ¹⁶	24
Obrázek 1.14 - Oblasti plastických deformací v zóně řezání. ¹⁷	24
Obrázek 1.15 - Nárůstek na ostří nástroje z KNB. ¹⁷	26
Obrázek 1.16 - Druhy třísek (a-trhaná, b-elementární, c-člankovitá, d-plynulá). ¹⁷	26
Obrázek 1.17 - Lamač třísky, který je součástí nástrojového držáku.	27
Obrázek 2.1 - Rozklad síly obrábění při soustružení. ²⁰	28
Obrázek 2.2 - Rozložení složek řezných sil při podélném soustružení. ²¹	29
Obrázek 2.3 - Vliv κ_r na velikost vektoru F_p a F_f . ²²	30
Obrázek 2.4 - Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek síly obrábění. ²²	30
Obrázek 2.5 - Vlevo mechanický dynamometr prstencový, vpravo třmenový. ²⁵	33
Obrázek 2.6 - Indukční snímač sil. ²⁴	34
Obrázek 2.7 - Piezoelektrický dynamometr KISTLER pro měření řezných sil při soustružení. ²⁵	35
Obrázek 2.8 - Porovnání jednotlivých typů dynamometrů. ²⁵	37
Obrázek 2.9 - Příklad cejchovacích křivek. ²⁰	37
Obrázek 3.1 - Upnutí dynamometru do revolverové hlavy. ¹⁷	38
Obrázek 3.2 – Obráběcí stroj S80i / 1000 od společnosti Kovošvit Mas, a.s. ¹	39
Obrázek 4.1 – Graf srovnání celkové síly obrábění F u všech VBD.	42
Obrázek 4.2 – Graf srovnání silové složky F_c u všech VBD.	42
Obrázek 4.3 – Graf srovnání silové složky F_p u všech VBD.	43

Obrázek 4.4 – Graf srovnání silové složky F_f u všech VBD.....	43
Obrázek 5.1 - Graf srovnání celkové síly obrábění.....	44
Tabulka 1.1 - Důležité stupně vývoje tvrdých povlaků. ²	17
Tabulka 1.2 - Srovnání vlastností základních povlakových materiálů. ²	17
Tabulka 3.1 - Parametry obráběcího stroje ¹	39
Tabulka 4.1 - Měřené řezné síly jednotlivých VBD.	41

Úvod

Vývoj a inovace řezných nástrojů trvá již několik desetiletí a zřejmě v tomto odvětví v budoucnu přibude ještě mnoho pokroků a objevů. Nároky na VBD se neustále zvyšují, ať už kvůli požadovaným vysokým řezným parametrům či vysoké kvalitě obrobeného povrchu. V dnešní době je velký zájem o nejmodernější řezné nástroje a materiály i přes jejich vyšší cenu na trhu. Slinuté karbidy jsou nejpoužívanější řezný materiál, protože svými vlastnostmi splňují náročné požadavky. Z důvodů jejich vlastností nacházejí uplatnění v široké oblasti aplikací. Lze je použít k obrábění většiny materiálů, které se ve strojírenství používají. Velký technický a také ekonomický přínos mělo povlakování slinutých karbidů. Díky povlakům řezných nástrojů dochází k navýšení parametrů obrábění, řezného výkonu a prodloužení životnosti. Podle odhadů jsou povlakované slinuté karbidy využity při více než 75 % soustružnických operací. Své uplatnění samozřejmě nachází i při jiných operacích.

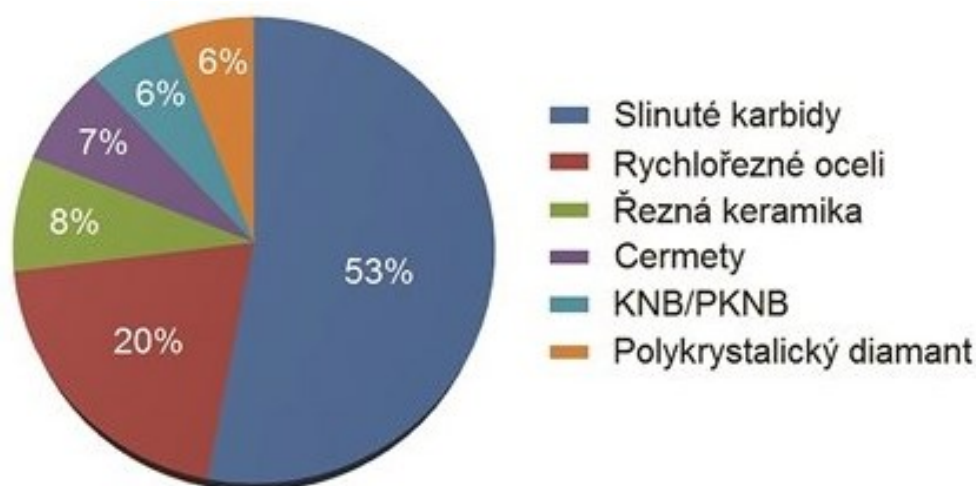
Cílem této bakalářské práce bylo změřit a vyhodnotit řezné síly vybraných vyměnitelných břitových destiček od firmy Dormer Pramet s.r.o. Jedná se o soustružnické negativní VBD, jejichž řezné síly byly měřeny pomocí tříložkového univerzálního dynamometru od společnosti KISTLER na polotovaru oceli ČSN 12 050 za sucha a za předem stanovených řezných podmínek. Měření proběhlo na soustružnickém stroji S80i / 1000 v prostorách firmy Dormer Pramet s.r.o.

1 Obecná charakteristika daného problému

Řezné síly jsou dynamické jevy, při nichž z počátku roste síla na určité maximum (oddělení třísky od základního materiálu) a následně poklesne. Skutečná velikost a průběh řezných sil se měří pomocí dynamometru Kistler, který je založený na základě piezoelektrického jevu. Následně lze vyhodnotit, jestli jsou řezné podmínky příznivé a jak mohou ovlivnit trvanlivost nástroje. Tato práce se zabývá měření řezných sil u negativních VBD od společnosti Dormer Pramet s.r.o.

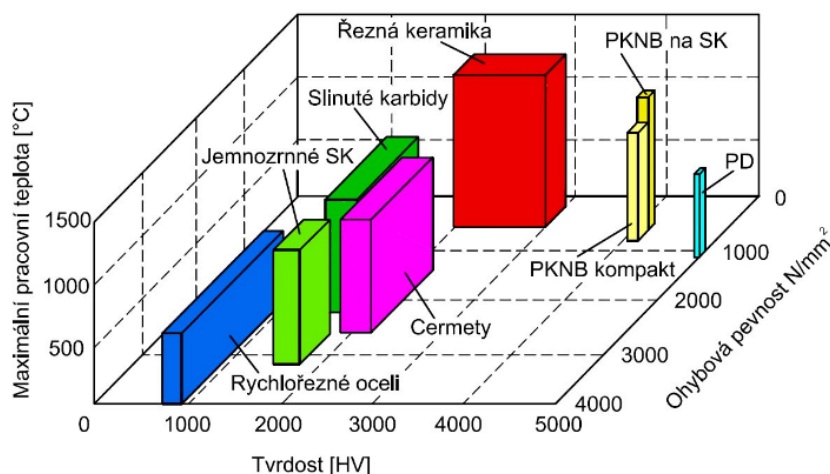
1.1 Materiály pro výrobu VBD

Při výrobě vyměnitelných břitových destiček je největší důraz kladen na vysokou houževnatost materiálu a zároveň na vysokou tvrdost ostří, která musí být odolná vysokým pracovním teplotám. Díky dlouholetému vývoji a výzkumu lze dnes vybírat z velice širokého sortimentu řezných materiálů určených k výrobě VBD.



Obrázek 1.1 - Aktuální využití nástrojových materiálů.³

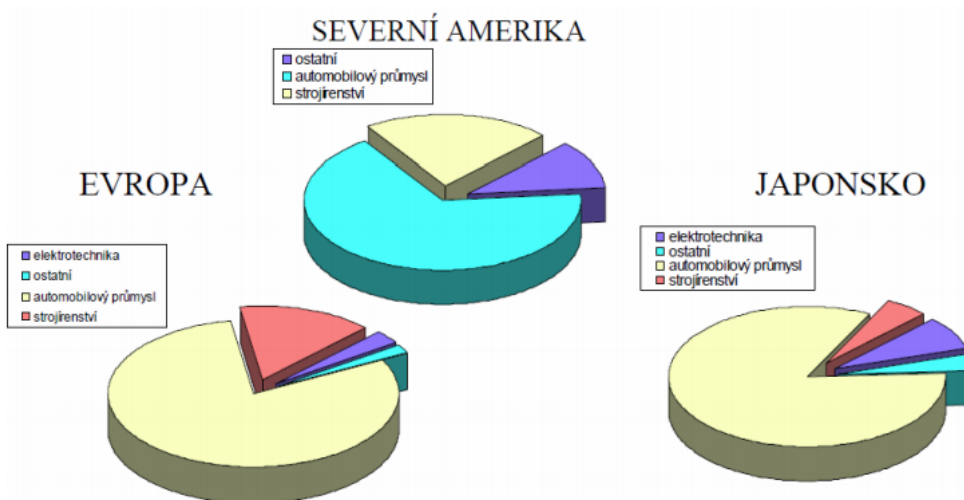
Dnešní řezné nástroje jsou vyráběny z mnoho různých materiálů. Jako nejdůležitější lze vypíchnout například nástrojové oceli (hlavně rychlořezné), SK, cermety nebo řeznou keramiku. V blízké budoucnosti není očekáván žádný objev nového materiálu, tudíž je největší úsilí kladeno na zlepšování vlastností aktuálních materiálů, a to převážně povlakováním.²



Obrázek 1.2 - Vlastnosti nástrojových materiálů.⁴

1.2 Nepovlakované slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nejpoužívanějším materiálem pro výrobu VBD. SK patří mezi křehké materiály. Vyrábí se pomocí práškové metalurgie, která nachází své využití například v automobilovém průmyslu, strojírenském nebo také v elektrotechnice. Lze díky ní vyrábět tvarově složité součásti, které nejsou nutné finálně obrábět, což je velká úspora času, energie i materiálu. Mezi další přednosti této technologie patří vysoká výkonnost výroby, lze spojovat dva druhy odlišných materiálů a mezi neposlední výhody patří také fakt, že odpad tvoří méně než 4 % zpracovávaného materiálu.^{2,7}



Obrázek 1.3 - Grafy využití práškové metalurgie po celém světě.⁷

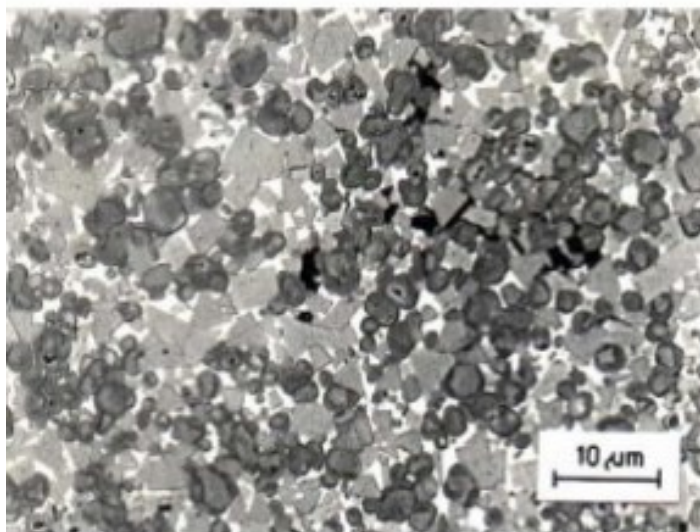
SK jsou složeny z tvrdých částic: WC, TiC, TaC a měkčího pojiva, jako je nikl, kobalt nebo molybden. První krok při výrobě SK je výroba prášku buď mechanicky nebo fyzikálně-chemickým způsobem. Následuje lisování prášků, přičemž dochází k zmenšení pórovitosti a dochází k plastické deformaci částic. Dalším krokem je slinování, jehož hlavním cílem je dosažení žádaných mechanických a fyzikálních vlastností. Poslední fáze výroby SK je konečná úprava leštěním nebo povlakováním. Při tahovém nebo ohybovém namáhání lze sledovat porušení materiálu téměř bez plastické deformace. Jsou však velice odolné proti normálovému tlakovému napětí.²

Narozdíl od ocelí jsou SK znatelně tvrdší a odolávají mnohem vyššímu tlakovému namáhání. Hustota slinutých karbidů je přibližně dvojnásobná oproti ocelím. Dále je až trojnásobný také modul pružnosti. Dle normy ČSN ISO 513 jsou v současnosti nepovlakované SK označovány HW a HF. Běžně se SK rozdělují do šesti skupin, z nichž první tři jsou nejpoužívanější – P, M, K, N, S, H.^{2,5,6}

P	Pro obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku. Značeny modrou barvou.
M	Pro obrábění materiálů tvořící dlouhou a střední třísku. Značeny žlutou barvou.
K	Pro obrábění materiálů tvořící krátkou a drobivou třísku. Značeny červenou barvou.
N	Pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku a mědi. Značeny zelenou barvou.
S	Pro obrábění žárovevných slitin na bázi niklu, kobaltu, železa a titanu. Značeny hnědou barvou.
H	Pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí nebo tvrzených litin. Značeny tmavošedou barvou.

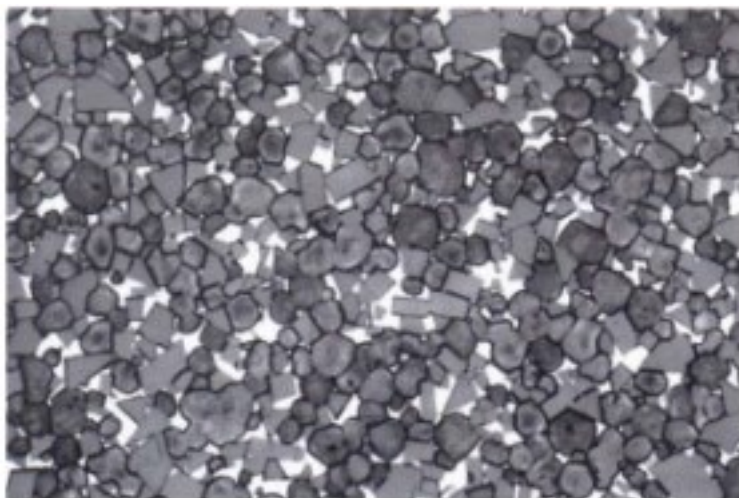
Obrázek 1.4 - Tabulka značení SK.⁵

Slinuté karbidy označené písmenem **P** se používají pro obrábění uhlíkových, slitinových a feritických korozivzdorných ocelí z důvodu vyšší tvrdosti zajištěné karbidem titanu. Hlavní nevýhodou je, že je méně odolný proti abrazi oproti karbidu wolframu. Dělí se na podskupiny P 01, P 10, P 20, P 30, P 40, P 50.⁸



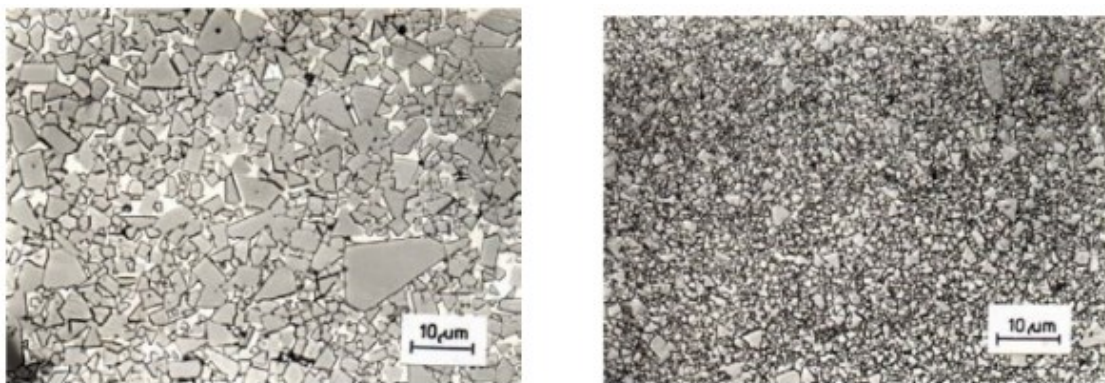
Obrázek 1.5 - Zobrazení slinutých karbidů typu P.⁸

Skupina **M** nachází využití při obrábění lité oceli, tvárné litiny a korozivzdorné austenitické oceli, manganové oceli. Dělí se na podskupiny M 10, M 20, M 30, M 40.⁸



Obrázek 1.6 - Zobrazení slinutých karbidů typu M.⁸

Slinuté karbidy skupiny **K** se nejčastěji používají pro obrábění nekovových materiálů, litiny nebo neželezné slitiny. Naopak pro obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku nejsou určeny z důvodu vyšší zátěže čela nástroje. Dělí se na podskupiny K 01, K 10, K 20, K 30, K 40, K 50.⁸



Obrázek 1.7 - Porovnání hrubozrnných a jemnozrnných slinutých karbidů typu K.⁸

1.3 Povlakované slinuté karbidy

Povlakování slinutých karbidů patří mezi nejdůležitější stupně vývoje v tomto průmyslu během dvacátého století. Jedny z prvních povlakovaných VBD se začaly prodávat koncem 60. let dvacátého století. Důvodem využívání této technologie je zlepšení vlastností slinutých karbidů. Vyrábí se nanášením tenké vrstvy s vysokou tvrdostí a dobrou odolností proti opotřebení, což je obzvláště při obrábění potřeba. Důvodem těchto lepších vlastností je, že vrstva povlaku neobsahuje žádné pojivo, má jemnější zrnitost a méně pórů a dutin.^{6,2}

Postupný vývoj povlaků:

1.generace

Jedná se o jednovrstvý povlak (TiC), jehož tloušťka je 6 µm. Má špatnou soudržnost podkladu a povlaku, což způsobuje neideální technologie výroby. Na přechodu podklad – povlak vzniká křehký eta-karbid. Během obrábění se povlak odlupuje, čímž dochází k znehodnocení nástroje.²

2.generace

Jedná se o jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN), jehož tloušťka je 7 až 10 µm. Díky zlepšení technologie výroby nevzniká eta-karbid na přechodu podklad – povlak. Nehrozí odlupování povlaku. K této generaci lze přiřadit SK P20 s povlakem TiC.²

3.generace

Jedná se o vícevrstvý povlak (dvě, tři nebo více vrstev). Povlak má ohraničené přechody jednotlivých vrstev, které jsou řazeny dle jejich vlastností. Mezi první vrstvy patří ty, které mají lepší přilnavost k povrchu a horší odolnost proti opotřebení. Jako poslední jsou nanášeny vrstvy s horší přilnavostí, ale vynikají vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebování a oxidaci za vyšších teplot.²

4.generace

Jedná se o speciální vícevrstvý povlak, který se skládá z deseti nebo více vrstev a mezivrstev. Má někdy více a někdy méně výrazné přechody jednotlivých vrstev. Vrstvy jsou tvořeny ze stejných materiálů jako u předchozí generace.²

Tabulka 1.1 - Důležité stupně vývoje tvrdých povlaků.²

Povlak	Materiál	Tvrdost [GPa]	Charakteristika
Jednovrstvý	TiN, TiC, Al ₂ O ₃	21, 28, 21	CVD při teplotě kolem 1000 °C na substrátech SK
	TiN, TiC	21, 28	PVD při teplotě ≤ 550 °C na ocelových substrátech
Multivrstvý	TiC/TiB ₂		Kolem 10 ³ mezifázových hranic TiC/TiB ₂
Jednovrstvý	c-BN	50	Chemická rozpustnost boru v železe
	diamant	90	Vysoká chemická aktivita k železu
	TiAlN		Odolnost proti oxidaci až do 800 °C
	DLC	65	Amorfni fáze
	CN _x	50÷60	Substechiometrická struktura (x=0,20÷0,35)
Supermřížkový	TiN/VN, TiN/NbN, atd.		Supermřížková perioda 5÷10 nm
Jednovrstvý	nc-MN/α-nitrid	~50	Nanokompozit, M=kov
	nc-MN/M		
	Ti _{0,4} Al _{0,6} N	~32	Nanokompozit, odolnost proti oxidaci až do 950 °C

Tabulka 1.2 - Srovnání vlastností základních povlakových materiálů.²

Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší ↑↑ Špatná	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

1.4 Metody povlakování

Povlakování SK probíhá tak, že se nanáší tenká vrstvá tvrdého a odolného materiálu proti opotřebení na podklad z běžného SK typu K, P nebo M. Základní metody povlakování se rozdělují na dvě skupiny – PVD a CVD. Nejvíce ovlivňujícími faktory účinnosti povlaku je například zvolená metoda, tvrdost, tloušťka, chemické složení.

Metoda PVD

PVD je zkratka z anglického „Physical Vapour Deposition“, což v překladu znamená fyzikální nanášení povlaků. Provádí se jako poslední krok při výrobě nástrojů. Při této metodě nedochází ke ztrátě houževnatosti materiálu ani deformacím. Povlakování probíhá ve vysokém vakuu, za nízké teploty a sníženého tlaku (0,1 – 1 Pa) kondenzací částic, které jsou uvolněny pomocí fyzikálních metod. Povlak se nejčastěji vytváří buď napařováním, naprašováním nebo iontovou implantací.^{9,2}



Obrázek 1.8 - Rotační držáky nástrojů pro PVD povlakování.⁹

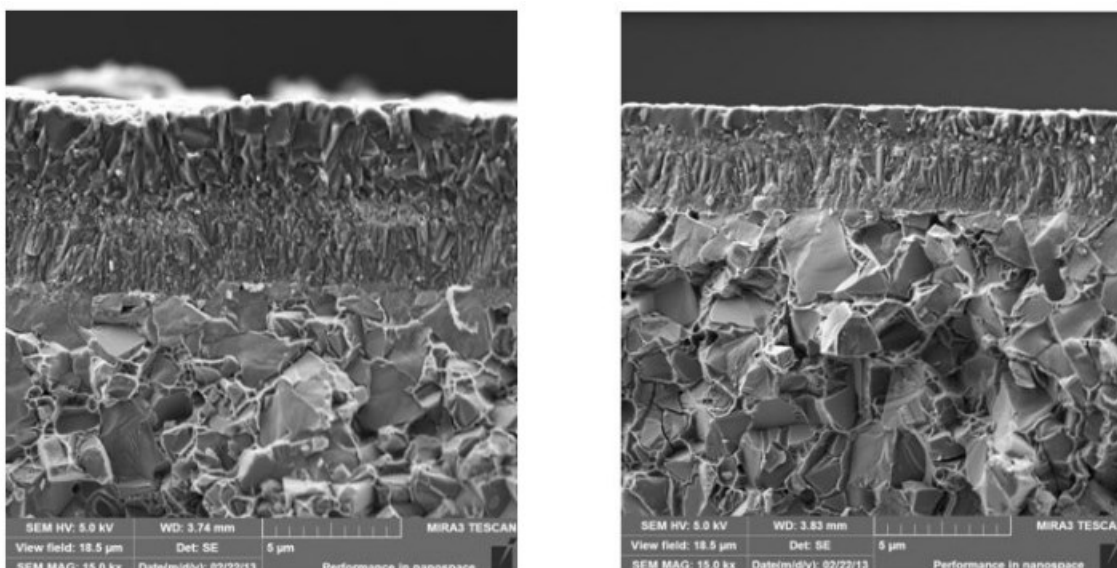
Nejdůležitějším prvním krokem je odmaštění a dokonalé očištění povrchu nástroje pomocí alkalických vodních roztoků tenzidů, ultrazvukových lázní nebo vodných oplachů. Následuje osušení teplým vzduchem nebo nahřátím v sušičkách. Ve vakuové komoře proběhne odčerpání povrchově vázaných plynů. Pokračuje se odstraněním několika nanometrů z vrstvy na povrchu nástroje. Zároveň probíhá ohřev nástrojů na požadovanou teplotu. PVD technologie probíhá za teplot v rozmezí 400-600 °C, přičemž se vytváří vrstva povlaku o tloušťce zhruba 5 μm.¹⁰

Mezi základní vlastnosti PVD povlaků patří vysoká otěruvzdornost, díky které je mnohonásobně prodloužená životnost například řezných nástrojů. Tepelná odolnost, která tvoří tepelnou bariéru a odolává teplotám do 800 °C je nejvíce využívána při vysokorychlostním obrábění, přičemž 78 % tepla odvádí tříska. Dále lze mezi výhodné základní vlastnosti zařadit korozivzdornost, snížení třecího odporu, adhezi a mikrotvrdot. Jako hlavní nevýhodu metody PVD lze označit nutnost pohybu předmětu, na který je nanášen povlak, z důvodu nanesení rovnoměrné vrstvy povlaku a dále také nutná důkladná počáteční příprava povrchu povlakovaného předmětu.¹⁰

Základní užívaným povlakem je TiN. Má zlatou barvu a mikrotvrdot 20 – 25 GPa. Jeho hlavní výhodou je elasticita a dobrá adheze. Z důvodu jeho velkého procenta použití mají povlakovací střediska s tímto povlakem nejvíce zkušeností.¹⁰

Jako další běžně užívaný povlak je TiAlN, jehož mikrotvrdot se pohybuje mezi 25 – 33 GPa a jehož barva je od růžovofialové po černošedou. Vyznačuje se dobrou odolností proti vysokým teplotám, což je ideální pro obrábění vysokými rychlostmi. Mezi jeho zajímavost patří tvorba vrstvy Al₂O₃, který snižuje tření, zlepšuje řezné vlastnosti a zvyšuje difúzní odolnost.¹⁰

Povlak DLC se vyznačuje nízkým koeficientem tření a svojí vysokou mikrotvrdotí, která je až 60 GPa. Má černou barvu a jeho hlavní využití je na povlakování dílů v automobilovém průmyslu. Není vhodný na povlakování nástrojů určených pro obrábění ocele.¹⁰

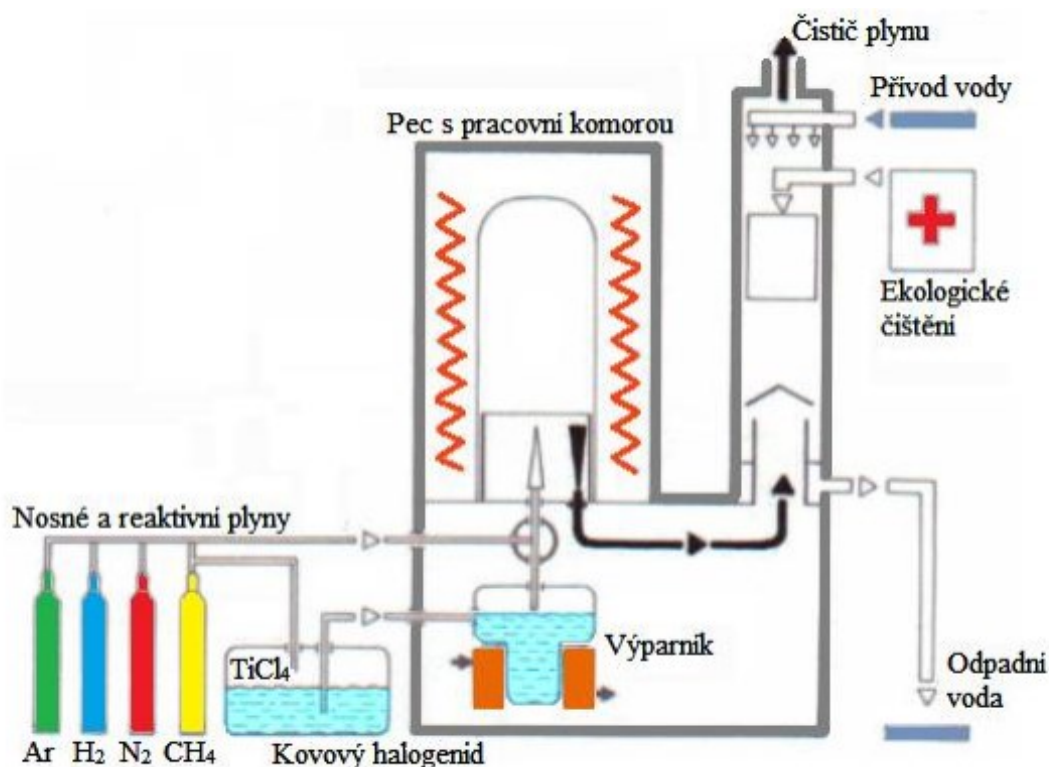


Obrázek 1.9 - Mikrostruktura PVD povlaku.¹¹

Metoda CVD

CVD je zkratka z anglického „Chemical Vapour Deposition“. Jedná se o chemické napařování z plynné fáze, které probíhá při teplotách 700 – 1050 °C. Při této metodě je vyžadované, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale zároveň prachovou sloučeninu, která se díky přivedené energii (buď ohřevem, plazmovým obloukem nebo laserem) chemicky rozkládá. Povlakování probíhá za tlaků plynné atmosféry 1 – 100 kPa.^{2,12}

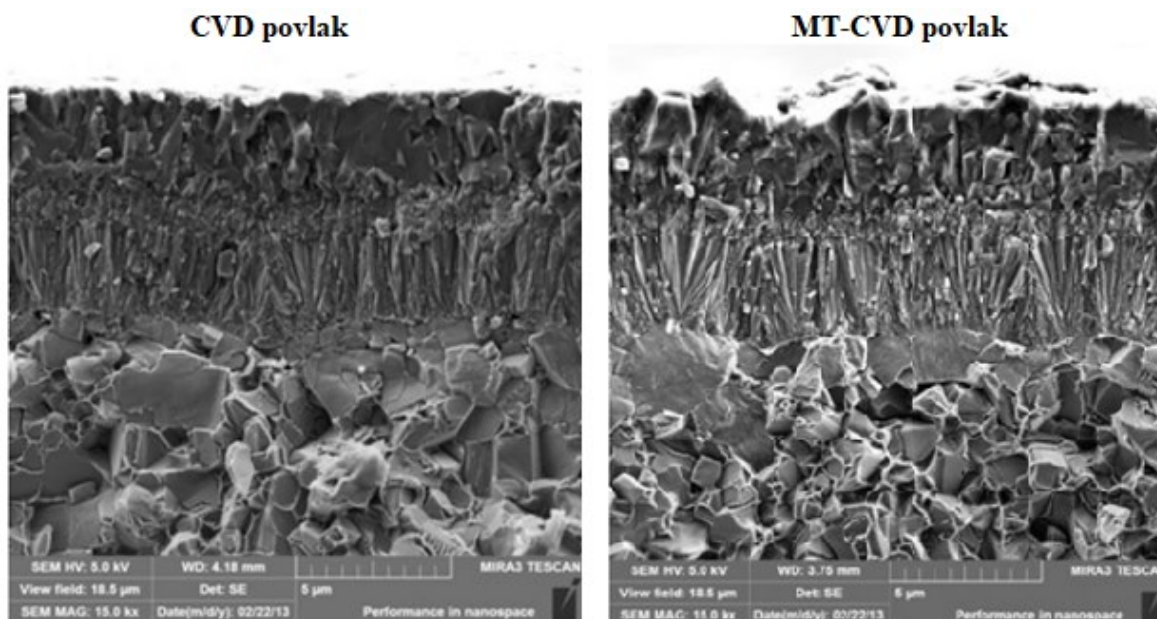
Tato metoda se vyznačuje dobrou adhezí ke slinutým karbidům a vysokou odolností proti opotřebení. Dochází k vytvoření stejnosměrných homogenních povlaků o větších tloušťkách oproti PVD metodě a to konkrétně 10 – 13 µm. Lze povlakovat i tvarově složitější předměty. Obecně je známo, že tato metoda má silnější vazbu mezi povlakem a substrátem, z čehož vyplývá, že povlaky CVD jsou oproti PVD tvrdší a poskytují nástrojům delší životnost. Metoda CVD má čtyři varianty, které jsou: tepelně indukovaná, plazmaticky aktivovaná, elektronově indukovaná (paprsek elektronů) a fotonově indukovaná (například laserem).^{2,12}



Obrázek 1.10 - Schéma CVD povlakovacího zařízení.¹³

Mezi moderní technologie CVD povlakování patří hojně využívané metody s názvem MT-CVD (Medium Temperature Chemical Vapour Deposition) a PA-CVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition). Jejich rozdíl oproti klasické CVD metodě jsou nižší pracovní teploty. I přesto, že se u PA-CVD povlak vytváří při teplotách kolem 600 °C, princip nanášení povlaků z plynné fáze zůstává totožný jako u běžné metody. Při technologii MT-CVD se pracovní teploty pohybují v rozmezí 700 – 800 °C. Díky těmto nižším teplotám neklesá houževnatost podkladového SK, tudíž povlakované VBD lépe odolávají proti mechanickým rázům.^{2,12}

Hlavní složkou CVD povlaků je MT-Ti (C,N), což je karbonitrid titanu, díky kterému je zajištěna tvrdost a odolnost proti otěrům. Tyto vlastnosti zajišťují menší opotřebení na hřbetu nástroje. Další důležitou složkou je CVD-Al₂O₃. Povlaky oxidu hliníku, které jsou chemicky inertní a mají malou tepelnou vodivost. Zastávají funkci tepelné clony a zajišťují lepší odolnosti proti plastické deformaci. Povlaky nitridu titanu – CVD-TiN zlepšují houževnatost při obrábění s přerušovaným řezem a zajišťují menší ulpívání obráběného materiálu na nástroji.^{2,12}



Obrázek 1.11 - CVD povlak vlevo a MT-CVD povlak vpravo.¹¹

1.5 Představení firmy Dormer Pramet s.r.o.

Firma Dormer Pramet s.r.o. je strojírenská firma sídlící v Šumperku, specializující se na široké spektrum velice kvalitních nástrojů. Největší náplní výroby jsou vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů pro soustružení, frézování, obrábění otvorů a závitování. Dále také nabízí nástroje pro upichování, monolitní frézy, vrtáky, závitníky a očka, karbidové technické frézy, výstružníky, záhlubníky nebo také karbidové závitovací frézy.

Monolitní nástroje jsou dodávány pod značkou Dormer a nástroje s VBD ze slinutých karbidů se dodávají pod značkou Pramet. Hlavní prioritou při výrobě je důslednost, kvalita a univerzálnost. Široký sortiment umožňuje využití produktů v obrovském množství odvětví po celém světě. Nástroje lze využívat například v odděleních údržby, výrobních dílnách, dále třeba v železničním, automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu.¹

Nabízené nástroje určené pro vrtání lze využít na otvory od průměru 0,15 mm až do 500 mm. Dále je v nabídce velký výběr vrtáků s využitím pro ruční a sloupové vrtačky, ale také pro CNC obrábění s tvrdokovovými vrtáky. Pro frézování lze v nabídce firmy najít široký výběr substrátů, včetně povlaků MT-CVD a PVD. Využití destiček je určeno pro univerzální, hrubovací a dokončovací aplikace.

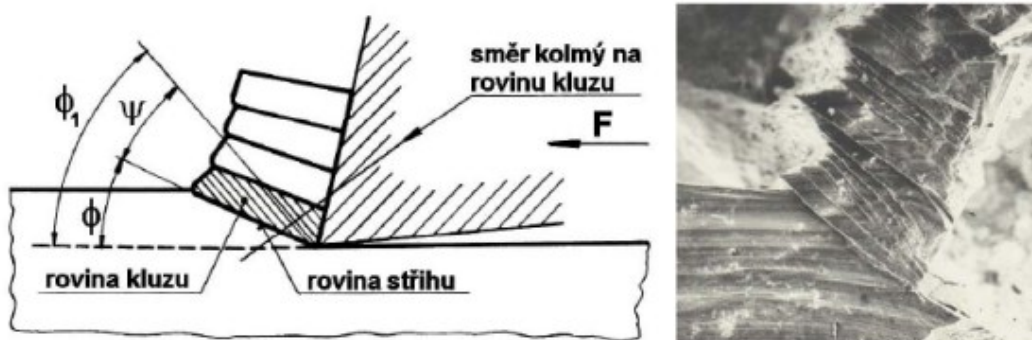
K výrobě závitů nabízí velký sortiment typů a profilů závitů pro průchozí i slepé otvory určené pro strojní i ruční použití. Součásti jsou také univerzální závitníky pro běžné, ale i specifické materiály, závitníky pro řezání i tváření a závitové frézy. VBD pro soustružení mají široký rozsah využití. Například všeobecné soustružení, upichovací, zapichovací, ale i kopírovací soustružení, drážkování nebo soustružení závitů. Obsahem nabídky jsou SK břitové destičky s MT-CVD, PVD nebo diamantovým povlakem, cermety a keramické materiály.¹



Obrázek 1.12 - Sortiment firmy Dormer Pramet s.r.o.¹

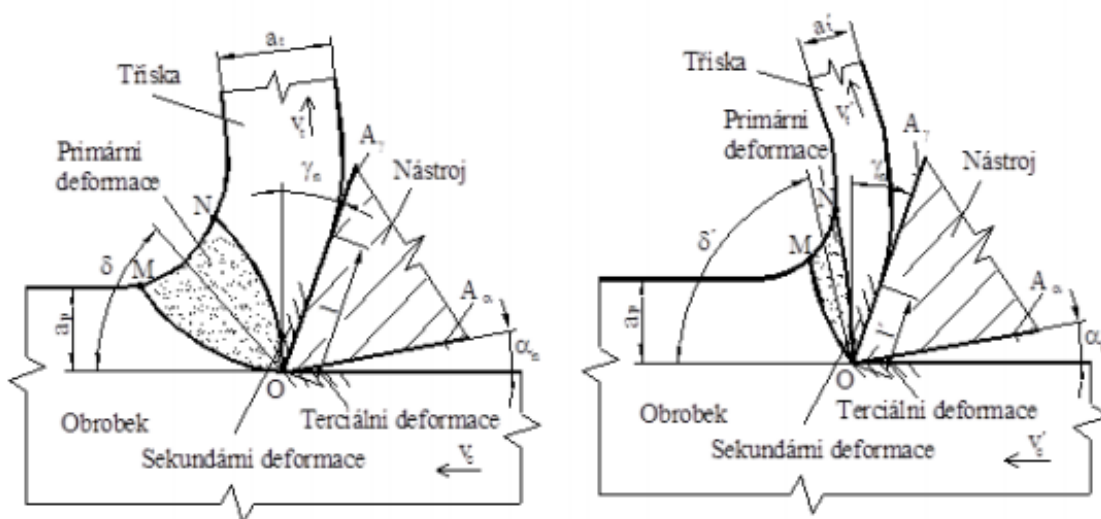
1.6 Teorie tvorby třísky

S řeznými silami souvisí i tvorba třísky při obrábění. Pronikáním nástroje do obráběného materiálu dochází při tvoření třísky k pružným a potom plastickým deformacím. Pružné deformace se rozkládají do celého objemu obrobku, naopak plastické deformace jsou rozkládány pouze v zóně řezání. Rostoucí smyková napětí mají za následek plastickou deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje – dochází k posuvu vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ_1 . Pokračujícím pohybem nástroje narůstá plastická deformace, přičemž dochází k přechování a posunu vrstev v materiálu kolmo na kluzné roviny. Působením kluzné síly nastává plastický lom, zatímco působením normálové síly nastává lom křehký.¹⁶

Obrázek 1.13 - Vznik třísky.¹⁶

Následným pohybem nástroje roste napětí v materiálu až po dosažení vyšší hodnoty, než je mez stříhu. Dochází k oddělení segmentu třísky, pod úhlem Φ , což je úhel stříhu. Rozdílem úhlů Φ_1 a Φ je úhel ψ , který se pohybuje v rozmezí $0 - 30^\circ$. Tvárné materiály (například ocel) vykazují nízké hodnoty úhlu ψ , naopak vysoké hodnoty vykazují křehké materiály (například šedé litiny).¹⁶

Při vytváření třísky se zaměřujeme na tři typy deformací: primární, sekundární a terciální deformace. Velikost primární plastické deformace je odvíjena od velikosti řezné rychlosti v_c . Stupeň plasticity závisí na rychlosti deformace. Dále se velikost deformace odvíjí od řezného prostředí, geometrie řezného nástroje, ale hlavně od fyzikálních vlastností obráběného materiálu jeho deformačních a zpevňovacích schopností. S rostoucí řeznou rychlostí se zmenšuje oblast primární plastické deformace a zvětšuje úhel stříhu.^{16,17}

Obrázek 1.14 - Oblasti plastických deformací v zóně řezání.¹⁷

Při obrábění vysokými rychlostmi je primární oblast deformace velice malá, kdy body M a N téměř splývají, tříská vzniká v jedné rovině. Naopak při obrábění nízkými rychlostmi je odřezávaný materiál výrazně plasticky deformovaný, vytváří se zpevněná tříška, která má několikrát větší tvrdost oproti původnímu obráběnému materiálu. Malý úhel stříhu a velký řezný odpor zpevněné třísky mají za následek zvětšení tloušťky třísky a_1 i plochy kontaktní zóny s čelem nástroje. S narůstající tloušťkou třísky a_1 narůstá i koeficient přechování třísky, který se značí písmenem K .^{17,18}

Koeficient přechování třísky K lze určit z matematického vzorce:¹⁸

$$K = \frac{a_1}{a} > 1 \quad 1.6.1.$$

Koeficient přechování třísky K lze stanovit i pomocí hmotností metody:¹⁸

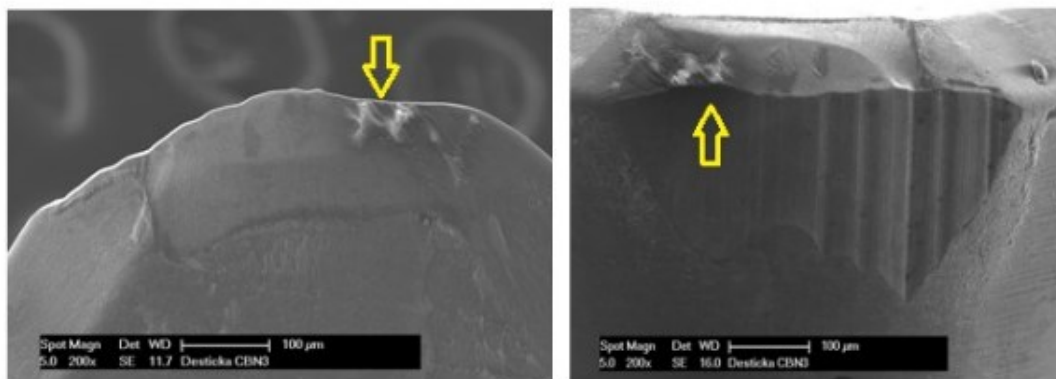
$$K = \frac{1000 \cdot m_1}{l' \cdot \rho \cdot S} > 1 \quad 1.6.2.$$

Vzorec pro výpočet intenzity primární plastické deformace ε :¹⁸

$$\varepsilon = \frac{K^2 - 2K \cdot \sin \gamma_n + 1}{K \cdot \cos \gamma_n} \quad 1.6.3.$$

Když je a_1 větší než a , odřezávaná vrstva materiálu se přechuje a rychlost odvádění třísky po čele nástroje je menší než řezná rychlost. Od velikost koeficientu K se odvíjí velikost deformace třísky a velikost složek síly řezání. Nízkou řeznou rychlostí dochází ke zpevňování povrchových vrstev materiálu. Čím vyšší řezná rychlost, tím vyšší je úhel stříhu.¹⁸

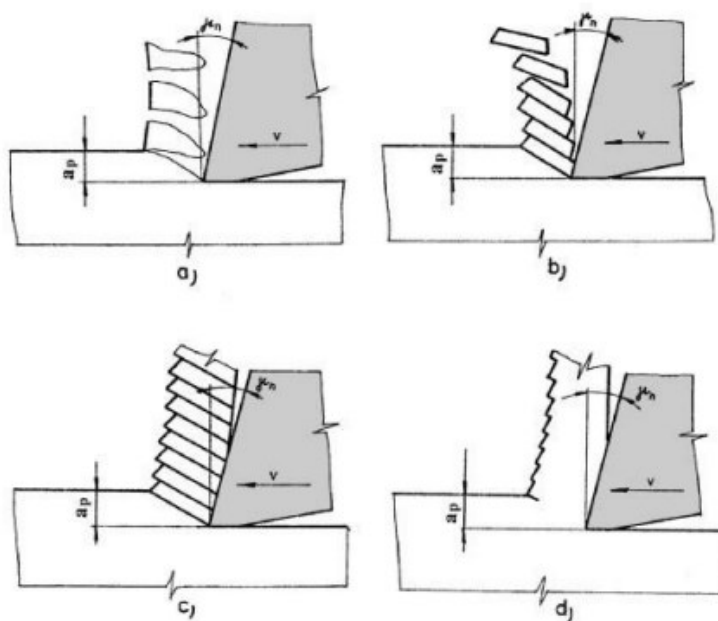
Druhou oblastí s plastickými deformacemi je oblast sekundární plastické deformace. Vzniká v kontaktní zóně kvůli působení velkých tlaků a intenzivnímu tření odcházející třísky po čele nástroje. Mezi vrstvou třísky a čela nástroje narůstá teplota a dochází k difuzním a abrazivním jevům, které mají za následek opotřebení čela nástroje. Vznikají mikroskopické adhezní svary, které se díky dalšímu pohybu plynule odtrhávají. U speciálních obráběných materiálů může za určitých řezných podmínek vznikat nárůstek na čele nástroje, který má vysokou pevnost, tvrdost a může chránit břit nástroje proti opotřebení. Tvorba nárůstku ovlivňuje řeznou geometrii, rozměry obráběného materiálu a způsobuje kmitání.¹⁸



Obrázek 1.15 - Nárůstek na ostří nástroje z KNB.¹⁷

Třetí oblast s plastickými deformacemi se nazývá terciální. Když odřezáváme větší tloušťku vrstvy, než je poloměr špičky nástroje, tloušťka materiálu, která se břitem právě neodebírá, odchází pod břit nástroje, kde dochází k její deformaci a zpevnění. Při dopružení obráběného materiálu na hřbet nástroje dojde ke tření, čímž vzniká terciální plastická deformace. Tato deformace má vliv na drsnost obráběného povrchu a také na zbytková napětí, které z důvodu vysokých teplot a strukturních změn vznikají v povrchové vrstvě.¹⁷

Následným navyšováním síly, která působí na odebíranou vrstvu materiálu dojde k vyčerpání plastické deformace a navyšování napětí až na hranici meze pevnosti materiálu ve stříhu. Kvůli posunu atomárních rovin ve struktuře obráběného materiálu, nastává odštížení segmentu z povrchu v podobě třísky. U většiny materiálů dochází k tvorbě soudržné (tvářené) třísky. Tříska trhaná vzniká, když normálová napětí převyšují napětí tečná. Naopak, když tečná napětí převyšují normálová, vzniká tříska stříhaná.¹⁹



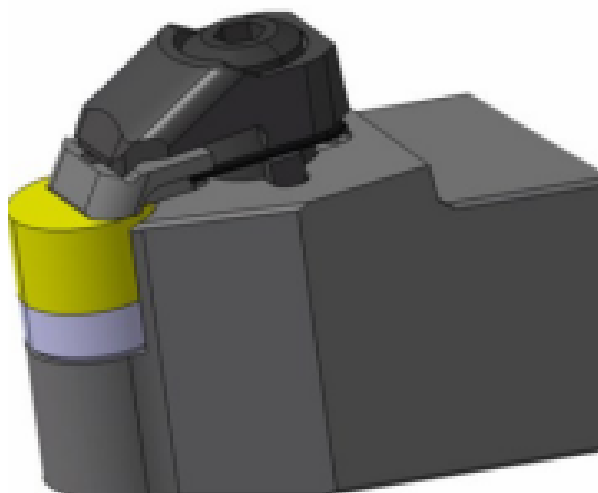
Obrázek 1.16 - Druhy třísek (a-trhaná, b-elementární, c-člankovitá, d-plynulá).¹⁷

Tříska soudržná (tvářená) se rozděluje na třísku plynulou nebo článkovitou, a to podle rozložení plastické deformace. U kovů s krychlovou prostorově nebo plošně středěnou krystalickou mřížkou, které mají vysokou tepelnou vodivost a nízkou tvrdost vzniká nejběžnější druh třísky, která se nazývá plynulá.¹⁹

Tříska článkovitá vzniká při obrábění kovů, které mají hexagonální krystalickou mřížku, nízkou tepelnou vodivost a vysokou tvrdost. Takovým příkladem jsou například titanové slitiny.¹⁹

Na tvorbu třísky mají vliv faktory, mezi které patří vibrace, teploty, pevnost nástroje, řezné síly, řezné podmínky, geometrie nástroje a v neposlední řadě vlastnosti obráběného materiálu. Tyto faktory mohou negativně ovlivňovat utváření třísky. Zmenšující se úhel nastavení hlavního ostří má za následek snižování tloušťky třísky a nárůst její šířky. Utváření třísky je ovlivněno poloměrem špičky nástroje, který určuje tvar třísky a její směr odchodu do určité hloubky řezu. Velikost a směr pohybu třísky určuje úhel nastavení hlavního ostří. Co se týká řezných podmínek, posuv a hloubka řezu má na tvar a velikost třísky větší vliv než řezná rychlost. Hodnota hloubky řezu má vliv na tvar třísky. Hodnota posuvu má vliv na průřez vytvářené třísky. Hodnota řezné rychlosti má za následek druh vzniklé třísky. Pokud je tato hodnota nízká, vzniká tříska plynulá soudržná. Při zvýšení řezné rychlosti, dochází od určité hodnoty ke vzniku soudržné článkovité třísky. Třísku elementární můžeme sledovat při vysokorychlostním obrábění.^{17,19}

Kvůli vhodnému utváření třísek se čela nástrojů opatřují lamači a utvařeči třísek, které mají za úkol dělení vzniklých třísek, z důvodu lepší manipulace a odvrácení možného nebezpečí poškození obráběného povrchu. Nástroje s negativní geometrií nemusí být opatřeny lamači třísek. U těchto nástrojů je mnohem pravděpodobnější vznik dlouhé plynulé třísky. Zde nachází využití nástrojové držáky, u nichž je lamač třísky jejich součástí.^{17,19}



Obrázek 1.17 - Lamač třísky, který je součástí nástrojového držáku.

2 Metodika měření řezných sil

2.1 Řezné síly

Kromě plastických a elastických deformací se při tvorbě třísky musíme zaměřit i na silové poměry, které se při tomto procesu prosazují. Znalost vznikajících silových poměrů nám umožňuje získávat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění. Díky znalosti silových poměrů můžeme také řešit technologické soustavy z hlediska pevnosti nebo tuhosti nebo dynamické stability řezného procesu.²⁰

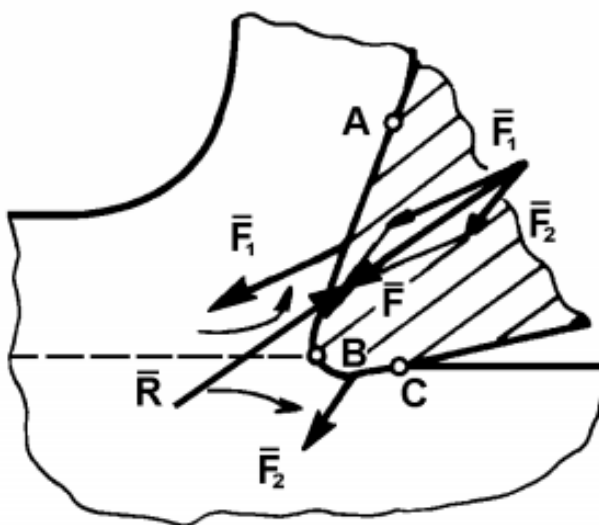
Nejvýznamnější silou je síla obrábění (řezání) F , kterou musíme chápat jako časově proměnnou veličinu. Řezný odpor R způsobuje napětí v obráběném materiálu a při obrábění musí být tento odpor silou obrábění neustále překonáván. Řezný odpor R je působení sil obrobku na nástroj, naopak síla obrábění F je celková síla nástroje, která působí na obrobek.²⁰

Musí platit podmínka rovnováhy:²⁰

$$F = -R (N)$$

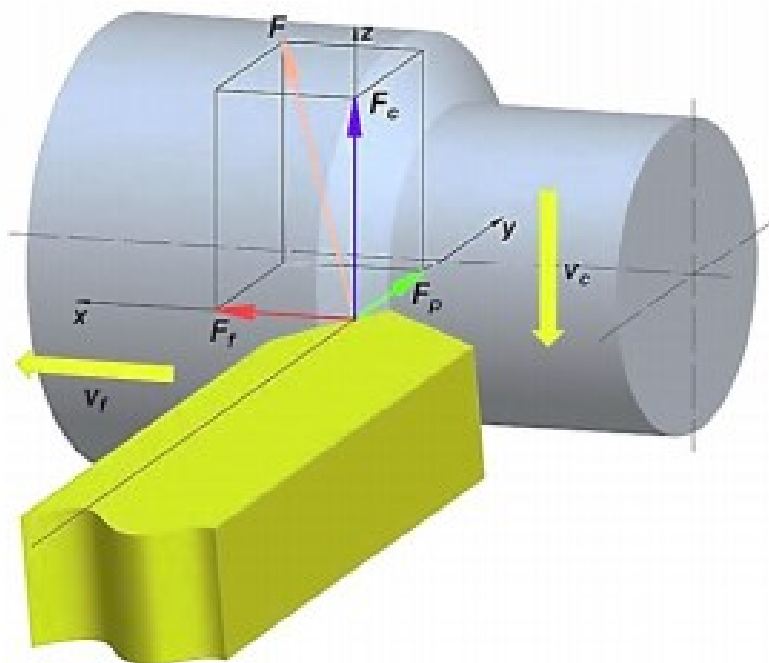
2.1.1.

Síla obrábění (řezání) je dynamický jev. Její okamžitá velikost F_{ok} kolísá (až do 20 %). Při obrábění za konstantních řezných podmínek také dochází ke kolísání. Toto kolísání způsobuje rozptyl mechanických vlastností obráběného materiálu a mechaniky tvorby třísky. Tudíž je pro věrohodnost měřených výsledků doporučeno experiment několikrát zopakovat.²⁰



Obrázek 2.1 - Rozklad síly obrábění při soustružení.²⁰

Síla obrábění se běžně rozkládá do složek, díky nimž můžeme určovat velikost a směr výsledného působení sil. Rozkládá se na aktivní složku obrábění F_1 a pasivní složku obrábění, která se značí F_2 . Složku F_1 můžeme dále rozložit jako řeznou složku síly F_c a posuvovou složku F_f . Pasivní složka síly již není dále rozkládána a označujeme ji F_p . Následně se pomocí vzorce vypočítá celková síla obrábění F .^{17,20}



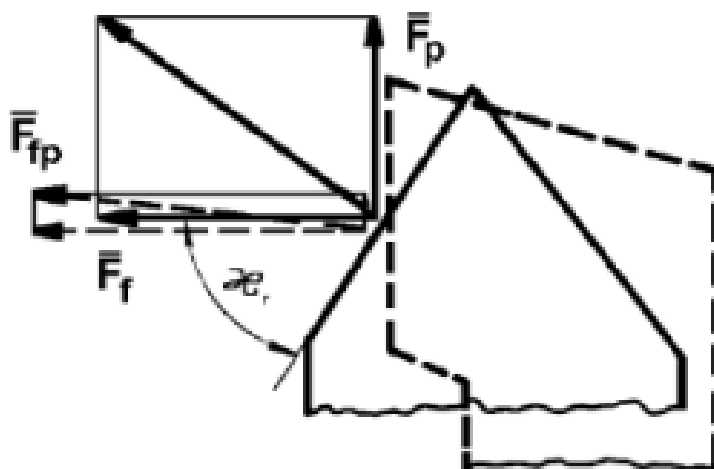
Obrázek 2.2 - Rozložení složek řezných sil při podélném soustružení.²¹

Nejvýznamnější je řezná (neboli tangenciální) složka síly F_c . Tato síla je základ pro stanovení podmínek při volbě řezných parametrů. Velikost této síly z velké části ovlivňuje kontakt a velikost tření mezi nástrojem a obrobkem neboli mezi třískou a čelem nástroje, utváření a lámání třísky. Její směr působení je ve směru hlavního řezného pohybu. Je určujícím faktorem pro potřebný výkon elektromotoru a celkového množství tepla, které je v zóně řezání vytvářeno. Závislost řezné složky F_c na velikosti obráběné vrstvy má stoupající tendenci. Stejný průběh má závislost řezné složky síly obrábění F_c na posuvu.^{17,20}

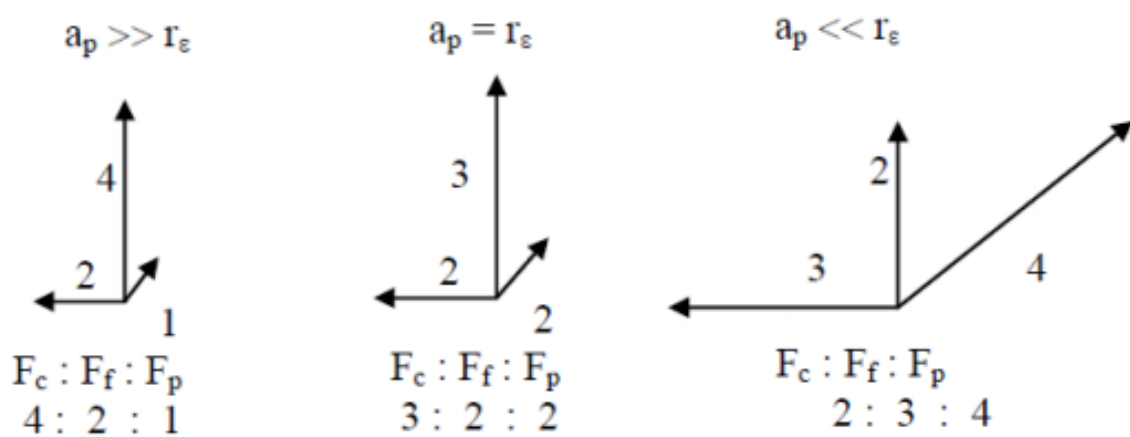
Pasivní složka síly F_p nazývaná také radiální, protože její působení je radiální v kolmém směru k ploše, která je obráběná. Pokud se jedná o podélné soustružení, její působíště je v rovině zadní. Její funkcí je přísuv nebo specifický tlak, který namáhá soustavu S-N-O (stroj – nástroj – obrobek), konkrétně její tuhost. Má velký vliv na přesnost rozměrů obráběných ploch, drsnost povrchu a také na odchylky geometrického tvaru a polohy.²⁰

Posuvová složka síly F_f (axiální) má směr působení stejný jako posuv nástroje a osa obrábění. Je kolmá na tangenciální a radiální složky síly. Využití nachází při dimenzování posuvových mechanismů. Poměr velikostí jednotlivých složek určuje především technologie obrábění, geometrie nástroje, řezné prostředí a také materiál řezného nástroje. Nejčastěji užívaným poměrem je $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$. Tento poměr platí pro úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 45^\circ$.

Se změnou úhlu nastavení se mění zároveň i vektory složek řezné síly F_p , F_f a také jejich výslednice. Na změnu jednotlivých složek má vliv také úhel čela. S klesající hodnotou úhlu čela narůstají složky síly F_f a F_p . Poloměr špičky r_ϵ má protichůdný vliv na velikost řezné síly oproti κ_r .²⁰



Obrázek 2.3 - Vliv κ_r na velikost vektoru F_p a F_f .²²



Obrázek 2.4 - Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek síly obrábění.²²

Na základě vyšetřených závislostí lze vypočítat vybrané složky síly obrábění. Pro podélné soustružení lze vycházet z mocninových závislostí:²³

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.2.$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.3.$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.4.$$

Exponenty x_{Fc} , x_{Fp} , x_{Ff} , y_{Fc} , y_{Fp} , y_{Ff} a konstanty C_{Fc} , C_{Fp} a C_{Ff} jsou empiricky stanovené pro dané podmínky řezného procesu. Celkovou sílu obrábění F lze stanovit ze vztahu:²³

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad 2.1.5$$

2.2 Nepřímé měření sil a momentů

Pro většinu metod nepřímého měření sil je potřeba znát vztah pro výpočet užitečného výkonu při obrábění:²⁰

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (\text{W}) \quad 2.2.1$$

Jednou z možností je **stanovení tangenciální složky z užitečného výkonu**, který je potřebný k obrábění. Prvním krokem je změřit výkon nezatíženého stroje, tzn. výkon chodu naprázdno P_o , poté proměřit celkový výkon obráběcího stroje při obráběcím procesu P_c .²⁰

$$P_{už} = P_c \cdot P_o \quad (\text{W}) \quad 2.2.2$$

Pro zjištění tangenciální složky síly obrábění budeme vycházet ze vztahu 2.2.1:²⁰

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \quad (\text{W}) \quad 2.2.3$$

Tato metoda nepřímého stanovení tangenciální složky síly obrábění není žádným způsobem náročná, není zapotřebí žádná speciální měřicí technika, pouze wattmetry, a je možné tuto metodu použít téměř u všech způsobů obrábění. Mezi její nevýhody však patří omezená přesnost měření, kterou způsobuje rozdílná účinnost stroje při obrábění a při chodu naprázdno. Další nevýhodou je zanedbání vlivů dalších složek síly obrábění na výkon elektromotoru obráběcího stroje.²⁰

Další metodou **stanovení tangenciální složky síly obrábění F_c je z točivého momentu M_k** . Tato metoda se využívá při vrtání. Má podobný princip jako předchozí metoda. Prvním krokem je změření celkového výkonu stroje, za pomoci univerzálního zapisovacího přístroje. Následuje vysunutí nástroje ze záběru. Při stejných otáčkách je vřeteno obráběcího stroje zatěžováno mechanickou brzdou, dokud nedosáhne stejného údaje na zapisovacím přístroji jako u předchozího obrábění. Z podmínky rovnováhy tedy plyne:²⁰

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (\text{N}\cdot\text{m}) \quad 2.2.4.$$

Na naměřené výsledky pomocí této metody nemá vliv rozdílná účinnost obráběcího stroje při zatížení a chodu naprázdno. Jsou ale ovlivněny proměnlivostí součinitele tření na mechanické brzdě. Tato metoda není příliš často používána.

2.3 Přímé měření sil a momentů

Základem přímého měření sil a momentů je měření deformací a namáhání v soustavě S-N-O, pomocí dynamometrů. Na začátku měření je obráběcí nástroj upnut na měřící zařízení – dynamometr. Přístroj při zátěži reaguje na vznikající složky síly obrábění a momentů vytvořením elektrického signálu, jenž odpovídá velikosti působící síly. Měřící přístroj musí zajistit nezávislost měřící veličiny na vlastnostech přístroje. Dalším požadavkem na dynamometr je schopnost měřit veličinu v určitém rozsahu s maximální přesností. Z těchto faktorů plynou základní požadavky, které musí dynamometry splňovat:^{17,18}

- **Tuhost** je zásadní pro dynamické měření.
- **Citlivost** musí být taková, že nejmenší odečítaná jednotka odpovídá celkové hodnotě měřené veličiny.
- **Stálost údajů** se odvíjí od tuhosti i citlivosti.
- **Reprodukovatelnost údajů**
- **Setrvačnost** závisí na hmotnosti soustavy. Hlavně při dynamickém měření, kdy je důležité sledovat skutečné maximální, minimální hodnoty měřené síly obrábění a její časový průběh, je vhodné, aby byla setrvačnost co nejmenší.
- **Konstrukce** musí zajišťovat vzájemnou neovlivnitelnost jednotlivých složek řezných sil.

Podle konstrukčního hlediska můžeme dynamometry rozdělit následovně:²⁵

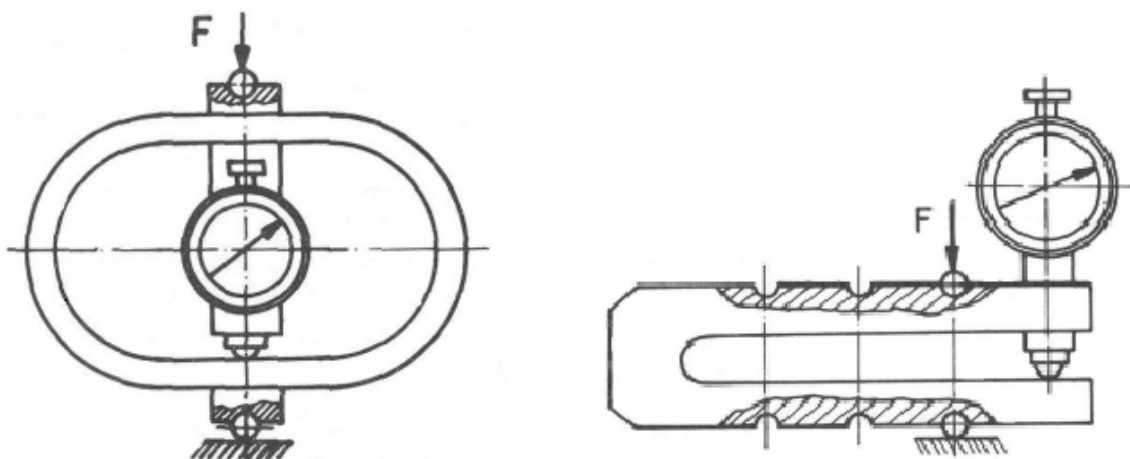
- **S pružným členem** (elektrický, pneumatický, mechanický, indukční).
- **Bez pružného členu** (piezoelektrický, uhlíkový, hydraulický).

Další rozdělení dynamometrů:²⁵

- **Dle počtu měřených složek síly obrábění** (jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a na měření točivých momentů).
- **Dle měřící metody** (elektrické, pneumatické, hydraulické, mechanické).
- **Dle metody obrábění** (pro soustružení, vrtání, frézování, broušení).

Mechanické dynamometry se nejčastěji využívají pro cejchování ostatních druhů dynamometrů. Jejich hlavní výhodou je téměř vždy možnost vyloučení nežádoucích rušivých vlivů. Působení síly je přenášeno přímo nebo násobně pomocí mechanického převodu na číselníkový úchylkoměr. Velikost síly je určena z deformace silových pružin, třmenů, membrán. Hlavní mechanický dynamometr je třmenový, který je určen pro zatížení do 10 000 N. Prstencové nebo kruhové dynamometry jsou určeny pro ještě vyšší zatížení.

Mechanické dynamometry se vyznačují svojí jednoduchostí, spolehlivostí, stálostí údajů a stálou přesností. Mezi jejich nevýhody lze zařadit závislost údajů na teplotě, nepříliš jednoduchá změna rozsahu a velká setrvačnost systémů, kvůli níž není jejich použití pro dynamická měření možné.^{24,25}



Obrázek 2.5 - Vlevo mechanický dynamometr prstencový, vpravo třmenový.²⁵

Hydraulické dynamometry využívají přenášení účinku měření síly či momentu na membránu hydraulického obvodu. Pohybem této membrány je zapříčiněna změna tlaku v kapalině, která je následně snímána například manometrem. Mezi výhody tohoto druhu dynamometrů patří jejich jednoduchá konstrukce a také jejich možnost jednoduché měření více složek sil současně. Naopak nízká citlivost a velká setrvačnost patří mezi nevýhody hydraulických dynamometrů. Z důvodu velké setrvačnosti jej nelze využívat na dynamická měření stejně jako u mechanických dynamometrů.^{24,25}

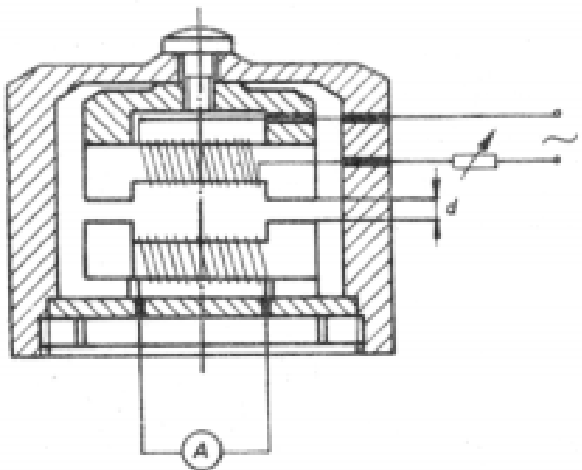
U **pneumatických dynamometrů** je hlavní podstatou využívání dynamických vlastností vzduchu. Snímačem deformace je klapka – tryska. Měří změnu tlaku nebo průtoku v závislosti na změně průřezu výtoku mezi klapkou a tryskou. Hlavní výhodou je jejich poměrně jednoduchá obsluha a údržba, nízké pořizovací a provozní náklady a také vysoká spolehlivost.^{24,25}

Mezi nejpoužívanější druh patří **elektrické dynamometry**. Obecně mezi jejich hlavní výhody patří možnost snímání signálu při rotujících či pohybujících se součástech, snadná dostupnost napájení nebo také využití miniaturních měřicích elementů.²⁵

Elektrické dynamometry indukční fungují na principu změny indukčnosti v obvodu snímače za působení měřené síly. Snímače pro tyto dynamometry lze rozdělit následovně:

- S malou vzduchovou mezerou
- S otevřeným magnetickým obvodem
- Se stálým magnetickým obvodem

Nejvíce využívané jsou prvně jmenované. Zatížením síly dochází se změně šířky vzduchové mezery, čímž dochází ke změně indukčnosti cívky.^{24,25}



Obrázek 2.6 - Indukční snímač sil.²⁴

Kapacitní elektrické dynamometry při měření velikosti deformace využívají změny kapacity snímačů. Mezi nejjednodušší kapacitní snímače patří deskový kondenzátor. Jejich výhodou je vysoká citlivost a nízká hmotnost. Nevýhodou však je jejich vysoká citlivost na vlivy okolí a vysoká náročnost na měřicí techniku. Kvůli těmto důvodům není použití kapacitních snímačů příliš časté.^{24,25}

U **piezoelektrických dynamometrů** se využívá snímání deformace piezoelektrického jevu. Křemen, Seignettovy soli a další materiály na bázi titaničitanu barnatého jsou nejvíce užívané piezoelektrické materiály. Základ těchto dynamometrů je vhodně vyříznutá měřicí destička z příslušného krystalu. Při zátěži se velikost náboje mění přímo úměrně velikosti působící síly. S poklesem zatížení dochází ke snížení velikosti náboje, až do úplného vymizení při nulovém zatížení. V současné době se hojně využívá moderních dynamometrů KISTLER.²⁵



Obrázek 2.7 - Piezoelektrický dynamometr KISTLER pro měření řezných sil při soustružení.²⁵

Při využití **elektrických odporových dynamometrů** se využívá změny odporu snímačů. Nejvíce používanými odporovými snímači jsou odporové tenzometry. Změnu odporu způsobuje deformace vodiče či polovodiče. Tenzometr se spolu s deformačním elementem deformují, kvůli jejich pevnému spojení. Odpor vodiče se mění přímo úměrně deformaci, která vzniká na elementu kvůli síle obrábění nebo točivému momentu. Deformace vodiče způsobuje změnu průřezu, délky a také měrného odporu materiálu vodiče.^{24,25}

Dle technologie výroby se dají elektrické odporové dynamometry rozdělit na:

- drátkové,
- fóliové,
- napářované.

Měřit odporové změny můžeme buďto potenciometricky nebo za využití můstkového zapojení. Hodnotu změny odporu můžeme stanovit výchylkovou metodou nebo metodou nulovací. Principem nulovací metody je vyvážení můstku za přidání odporu do ostatních větví, aby nastal stav rovnováhy. Používá se pro statická měření. U výchylkové metody se využívá stanovení výchylky galvanometru, která se mění přímo úměrně změně odporu a zároveň měřené deformaci. Lze tuto metodu využít pro statická i dynamická měření.²⁵

Dvousložkový elektrický dynamometr pro soustružení funguje jako držák soustružnického nože. Je ustaven na dva nosníky, které jsou souměrně umístěny k zatěžující síle. Na jednom z těchto nosníků jsou přilepeny tenzometry. Tímto dynamometrem měříme složky síly obrábění F_c a F_p . Kvůli vzájemnému ovlivňování jednotlivých měřených složek jsou tenzometry nalepeny tím způsobem, aby napětí v místě tenzometru pro snímání síly F_c bylo maximální od složky F_c a od složky F_p nulové.²⁵

Třísložkový dynamometr je složen z pláště, který má vysokou tuhost, z tělesa držáku nože a měřicích článků, jejichž součástí jsou tenzometrické snímače. Kvůli zamezení vniknutí třísek ke snímacím článkům je dynamometr opatřen krytem. Třísložkový dynamometr zpravidla využívá 8 snímacích článků. Uložení držáku v tělese je konstruováno přes kuličky v kulových lůžkách nebo působí přes plochu opěru. Kvůli této konstrukci je oproti dvousložkovému dynamometru nezbytné dbát na přesné vyložení nástroje podle délky vyložení cejchovacího hranolu.^{24,25}

Univerzální dynamometry mají monolitický celek základové desky a boční stěny opatřené odnímatelnými kryty. Otvor v přední desce je určen pro řezný nástroj. V horní části je otvor určený pro vývod částí měrného hranolu, kterým lze upnout soustružnický nůž i přípravek k univerzálnímu použití. Dynamometrem lze snímat složky síly obrábění F_c , F_p , F_f a také točivý moment. Univerzální dynamometr lze použít pro měření maximálních hodnot točivého momentu $M_k = 620 \text{ N}\cdot\text{m}$ a následných složek síly obrábění:²⁵

- F_c do 5900 N,
- F_p do 9500 N,
- F_f do 2000 N.

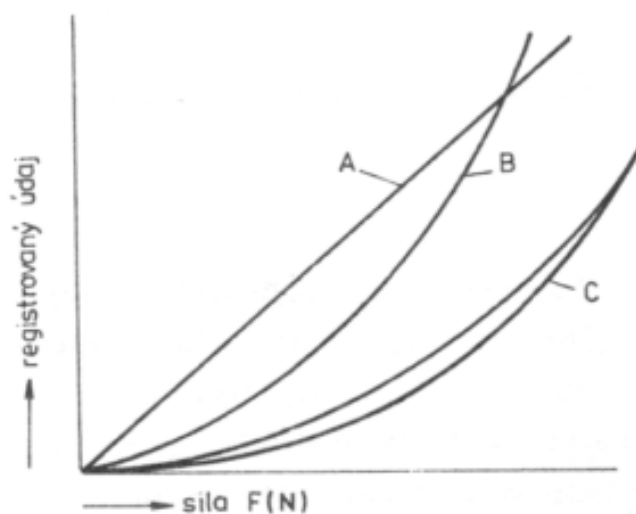
metóda merania	zkreslení	rozměry	rozsah	přesnost	porucovost	setrvačnost	cejchování	spolehlivost	náklady	obsluha
piezoelektrická	+	+	+	+	0	++	-	--	--	--
kapacitní	+	-	+	+	0	++	+	0	--	--
uhlíkového odporu	+	+	+	+	0	++	0	-0	+	++
kapalinového odporu	+	+	+	0	0	0	0	0-	+	+
indukční	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
magnetická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
tenzometrická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	++

+ výhodná charakteristika, 0 středně výhodná charakteristika, - nevýhodná charakteristika

Obrázek 2.8 - Porovnání jednotlivých typů dynamometrů.²⁵

2.4 Cejchování dynamometru

Na správnost a přesnost měření je potřeba dynamometr správným způsobem cejchovat. Tento pojem znamená srovnání údajů dynamometru se skutečnými hodnotami sledovaných veličin. Postupně zatěžujeme dynamometr měnící se silou, jejíž velikost předem známe. Na číselníkovém úchylkoměru odečítáme odpovídající výchylku. Zaznamenávání výsledků funguje tím způsobem, že se přímo vyjadřuje vztah mezi skutečným zatížením a údajem na měřicím zařízení. Výsledkem je sestrojení cejchovací křivky, která vyjadřuje závislost mezi danou složkou síly obrábění a odpovídající veličinou. Cejchování je běžně prováděno přímo na obráběcích strojích. Nastavení zatěžující síly probíhá pomocí závaží a pákového mechanismu.²⁰



A – ideální lineární závislost, B – nelineární závislost, C – křivka s hysterezi.

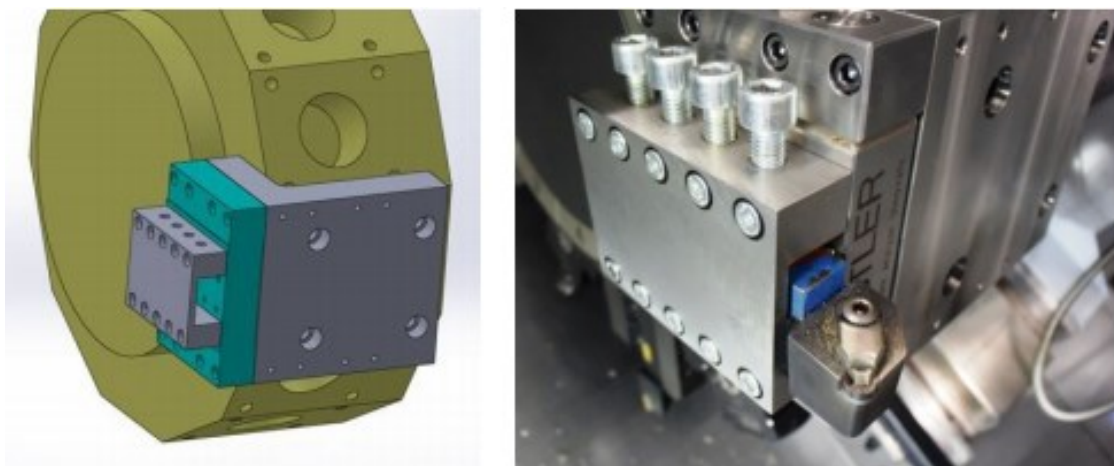
Obrázek 2.9 - Příklad cejchovacích křivek.²⁰

3 Návrh vlastního postupu měření

3.1 Dynamometr Kistler

Měření řezných sil bylo realizováno za použití tříslložkového univerzálního dynamometru KISTLER 9129AA. Základní jednotka dynamometru byla připevněna do speciálního držáku pro revolverové hlavy soustruhů viz obrázek 3.1 Následovalo upnutí soustružnického nože na základní jednotku dynamometru pomocí držáku.

Proběhlo měření třech na sebe kolmých sil F_x , F_y a F_z . Těmto silám byly podle nastavení přiřazeny jednotlivé složky síly obrábění F_c , F_p a F_f . Naměřené hodnoty se pomocí optického kabelu připojeného k základní jednotce dynamometru přivedly do zesilovacího zařízení KISTLER 5070A a následně transportovány do převodníku KISTLER 5697 v podobě milivoltaického napětí. V programu DynoWare 2825D – 02 od společnosti KISTLER proběhlo zpracování výsledků silového zatížení.



Obrázek 3.1 - Upnutí dynamometru do revolverové hlavy.¹⁷

3.2 Obráběcí stroj

Obrábění proběhlo na soustružnickém stroji s označením S80i / 1000 od společnosti Kovosvit Mas, a.s (viz obrázek 3.2). Tento stroj se využívá pro kusovou, malosériovou i sériovou výrobu součástí hřídelového typu. Stroj plně vyhovoval podmínkám našeho měření. Jeho technické údaje jsem shrnul do následující tabulky.

Tabulka 3.1 - Parametry obráběcího stroje¹

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon pohonu vřetena (max)	20,5	kW
Maximální krouticí moment na vřeteně	1 033	N·m
Maximální otáčky	3 800	min-1
Počet otáčkových řad	2	
Počet poloh nástrojové hlavy	12	
Průměr otvorů v nástrojové hlavě	50	mm
Výška osy vřetena	1 100	mm
Maximální průměr obrábění	465	mm

Obrázek 3.2 – Obráběcí stroj S80i / 1000 od společnosti Kovosvit Mas, a.s.¹

3.3 Ocel ČSN 12 050

Polotovár, na kterém bude prováděno měření je ušlechtilá konstrukční ocel s označením ČSN 12 050. Její chemické složení obsahuje 0,42 – 0,5 % uhlíku (C), 0,5 – 0,8 % manganu (Mn) a 0,17 – 0,37 % křemíku (Si). Je vhodná k povrchovému kalení a zušlechťování. Využití nachází na výrobu větších ozubených kol, čepů, vřeten soustruhů, šroubů, hřídelí, vrtacích tyčí, frézovacích trnů nebo lisů parních strojů. Tato ocel není vhodná na svařování.^{14,15}

4 Diskuze experimentů

4.1 Popis měření

Měření třech složek řezných sil dynamometrem proběhlo při vnějším soustružení polotovaru z oceli 12 050 o průměru $D = 120$ mm. U všech vyměnitelných břitových destiček se jedná o úhel ostří 93° . Řezné síly byly měřeny pro 7 typů VBD. Řezná rychlost byla nastavena na $v_c = 200$ m·min⁻¹ a hloubka řezu $a_p = 1,5$ mm. Jednotlivé složky řezných sil jsem měřil třikrát na každém typu VBD, přičemž u každého měření byla změna v posuvu.

Na první měření byl nastaven posuv $f_{ot} = 0,2$ mm/ot. Při druhém měření byl posuv změněn na 0,4 mm/ot a při posledním měření na 0,6 mm/ot. Získal jsem data o jednotlivých složkách sil ve třech osách F_x , F_y a F_z , přičemž jsem následně pracoval s jejich průměrnými hodnotami. Ve směru osy F_x jsem pozoroval posuvovou složku síly obrábění F_f , ve směru osy F_y se jednalo o hodnoty pasivní složky síly obrábění F_p a v poslední ose F_z hovoříme o řezné složce síly obrábění F_c viz obrázek 2.2. Následně jsem vypočítal sílu obrábění F pomocí následujícího vzorce:

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2} \quad [\text{N}] \quad 4.1.1.$$

Dále jsem vypočetl krouticí moment M_k a výkon P podle těchto vzorců:

$$M_k = \frac{F_c \cdot \frac{D}{2}}{1000} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad 4.1.2.$$

$$P = \frac{F_c \cdot \frac{v_c}{60}}{1000} \quad [\text{kW}] \quad 4.1.3.$$

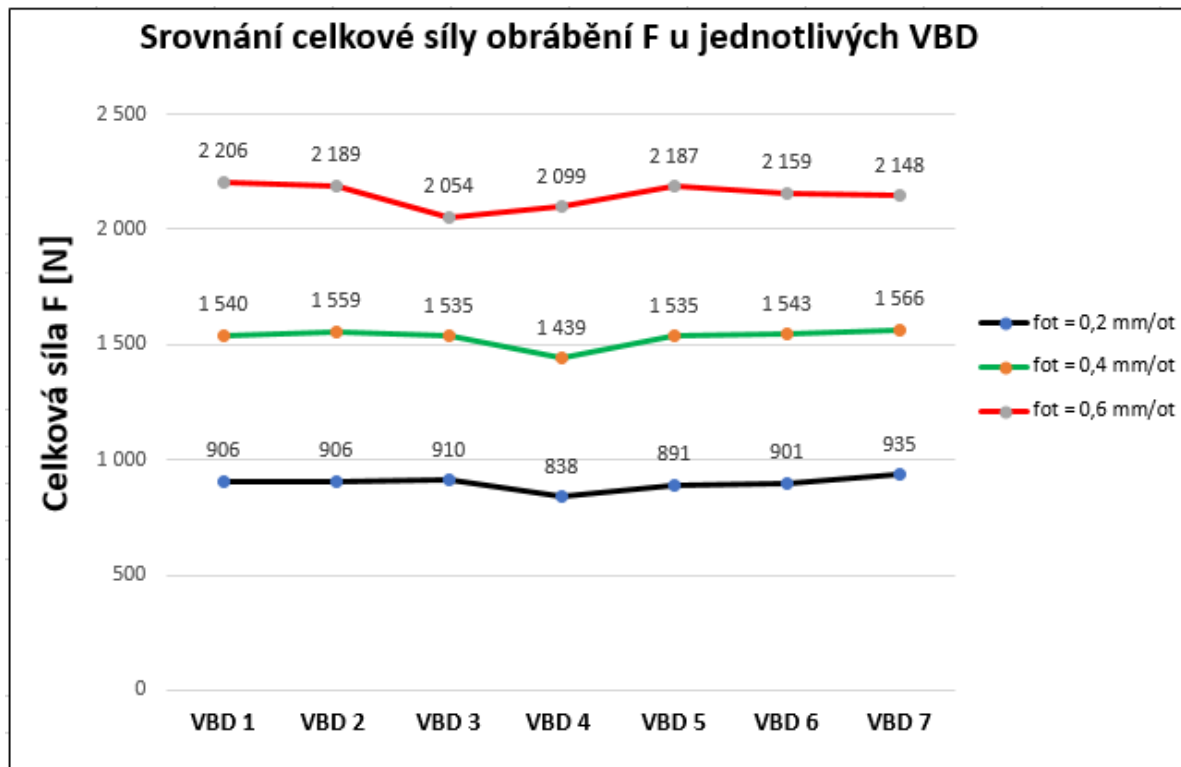
Zpracoval jsem tabulku všech naměřených průměrných hodnot jednotlivých VBD viz tabulka 4.1.

Tabulka 4.1 - Měřené řezné síly jednotlivých VBD.

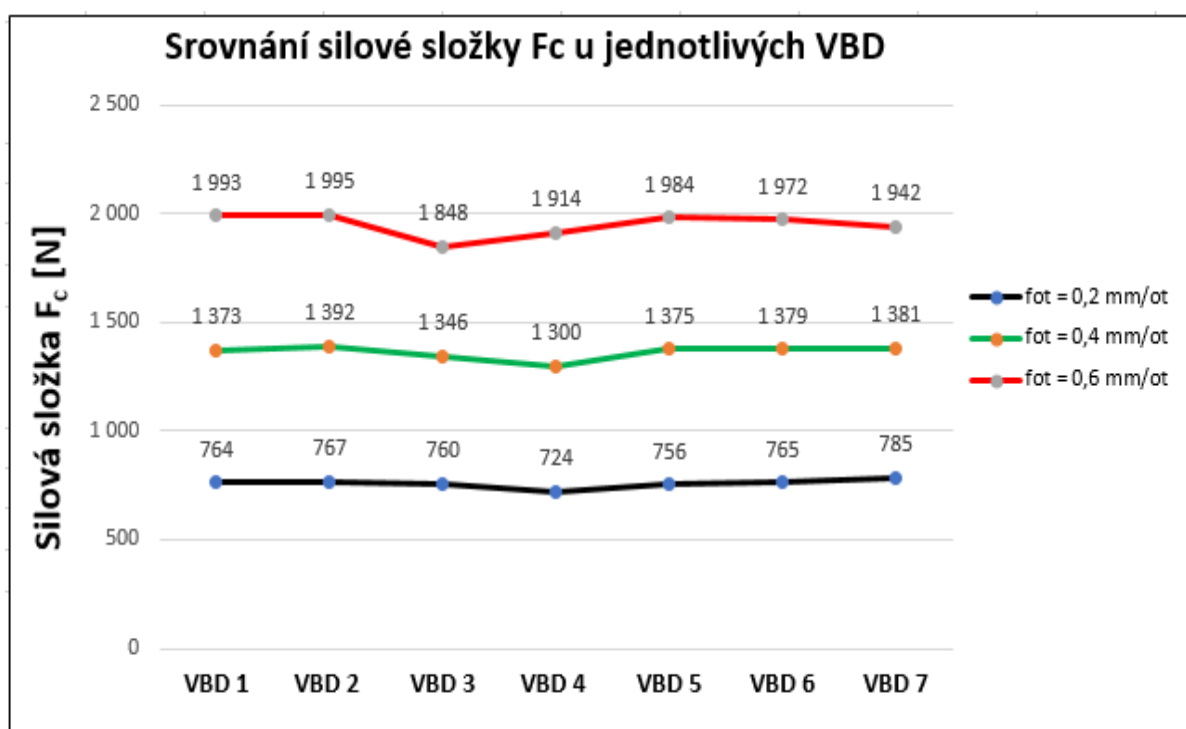
Úhel ostří = 93°			a _p = 1,5 mm			Obráběný materiál - 12 050		
Řezná rychlost v _c = 200 m·min ⁻¹						Obráběný průměr D = 120 mm		
VBD 1 - DNMG 150608E-RM								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	414	256	764	906	46	2.5
0.40	26.0	7.4	563	413	1 373	1 540	82	4.6
0.60	39.0	7.4	722	612	1 993	2 206	120	6.6
VBD 2 - DNMG 150608W-MR								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	414	248	767	906	46	2.6
0.40	26.0	7.4	578	397	1 392	1 559	84	4.6
0.60	39.0	7.4	712	554	1 995	2 189	120	6.7
VBD 3 - DNMX 150608W-M3								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	406	292	760	910	46	2.5
0.40	26.0	7.4	566	474	1 346	1 535	81	4.5
0.60	39.0	7.4	658	608	1 848	2 054	111	6.2
VBD 4 - DNMX 150608-WMX								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	339	252	724	838	43	2.4
0.40	26.0	7.4	467	402	1 300	1 439	78	4.3
0.60	39.0	7.4	636	583	1 914	2 099	115	6.4
VBD 5 - DNMG 150608E-RM								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	402	248	756	891	45	2.5
0.40	26.0	7.4	554	398	1 375	1 535	83	4.6
0.60	39.0	7.4	704	592	1 984	2 187	119	6.6
VBD 6 - DNMG 150608W-MR								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	414	233	765	901	46	2.6
0.40	26.0	7.4	575	386	1 379	1 543	83	4.6
0.60	39.0	7.4	702	528	1 972	2 159	118	6.6
VBD 7 - DNMX 150608W-M3								
f _{ot} [mm/ot]	Dráha [mm]	Čas [s]	F _f [N]	F _p [N]	F _c [N]	F [N]	M _k [N·m]	P [kW]
0.20	13.0	7.4	411	298	785	935	47	2.6
0.40	26.0	7.4	557	486	1 381	1 566	83	4.6
0.60	39.0	7.4	663	634	1 942	2 148	117	6.5

Dalším krokem bylo zpracování grafů, ve kterých jsem srovnával naměřené hodnoty jednotlivých složek sil u všech VBD. Nejdůležitější je graf srovnání celkové síly obrábění F viz obrázek 4.1.

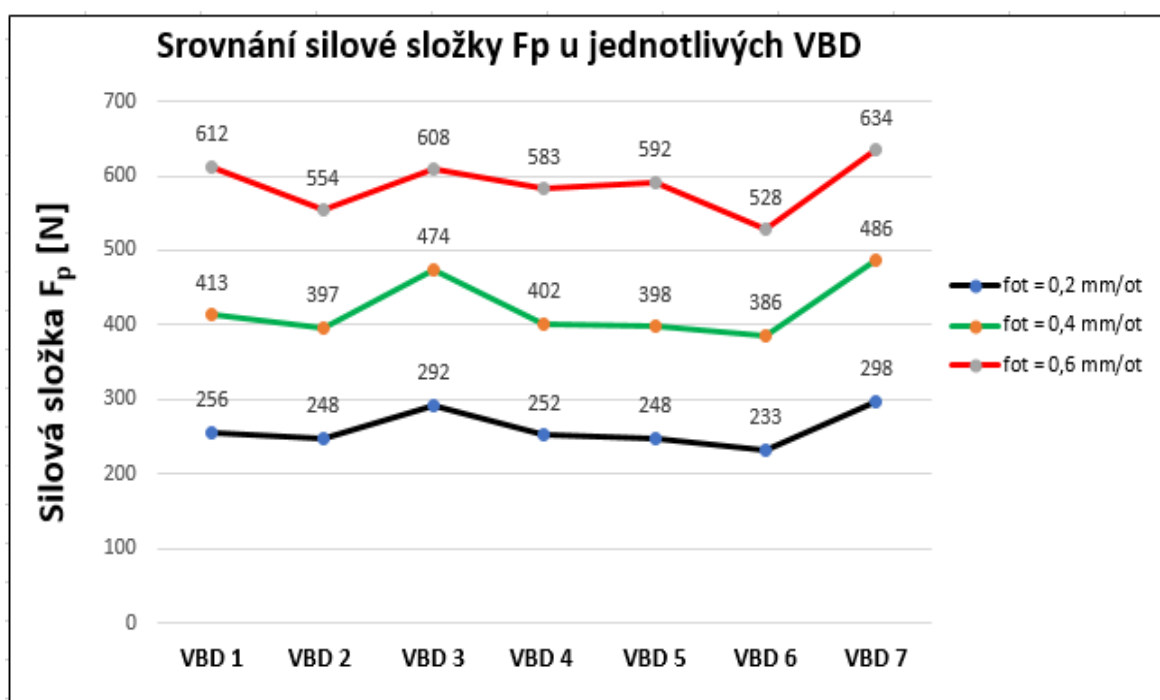
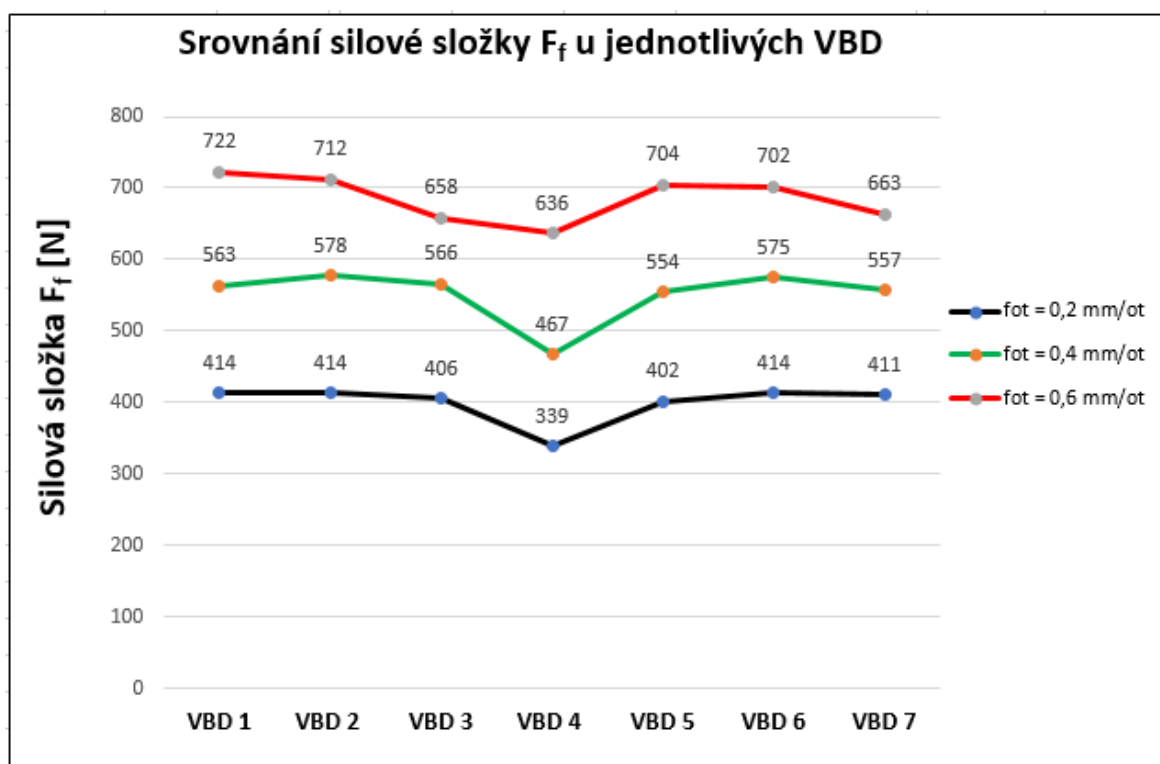
4.2 Grafy



Obrázek 4.1 – Graf srovnání celkové síly obrábění F u všech VBD.



Obrázek 4.2 – Graf srovnání silové složky F_c u všech VBD.

Obrázek 4.3 – Graf srovnání silové složky F_p u všech VBD.Obrázek 4.4 – Graf srovnání silové složky F_f u všech VBD.

5 Technicko-ekonomické zhodnocení

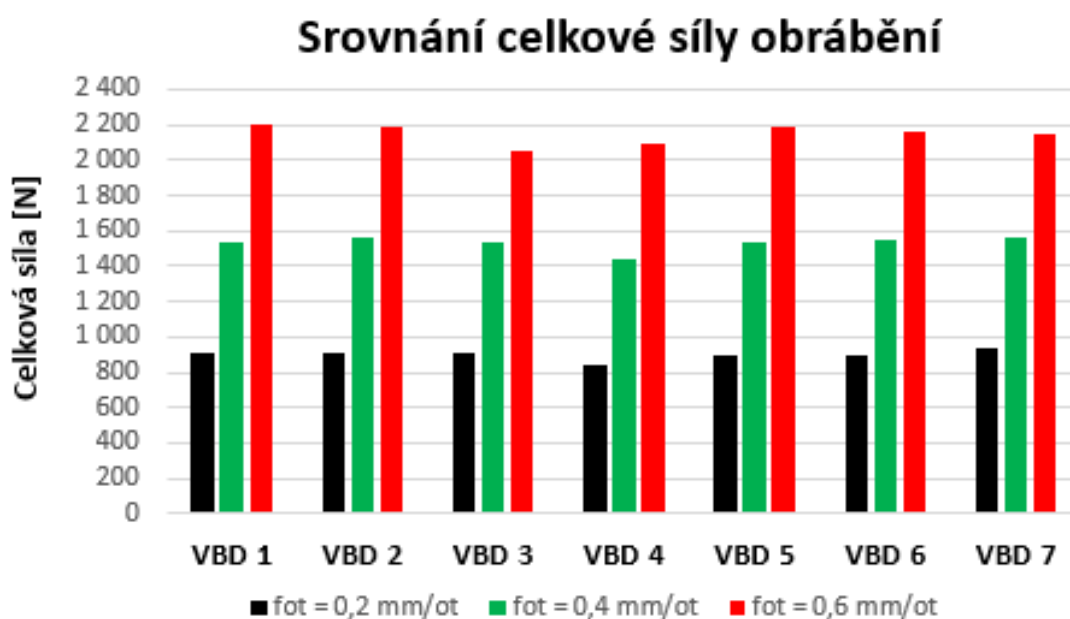
Měřil jsem řezné síly u 7 typů VBD. Každá destička byla měřena při třech různých hodnotách posuvu f_{ot} . Nejvíce přínosný je graf srovnání celkové síly obrábění F viz obrázek 4.1. Čím je nižší hodnota naměřené síly, tím má VBD lepší vlastnosti.

Z tohoto grafu lze vyčíst, že při posuvu $f_{ot} = 0,2$ mm/ot byla naměřena nejmenší hodnota síly obrábění $F = 724$ N u VBD 4, z čehož vyplývá že se jedná o destičku s nejlepšími vlastnostmi. V porovnání s nejvyšší naměřenou hodnotou u VBD 7, $F = 785$ N, se jedná zhruba o 8 % rozdíl v silovém zatížení.

Destička s nejmenší naměřenou silou obrábění F při posuvu $f_{ot} = 0,4$ mm/ot byla zjištěna VBD 4, u níž $F = 1300$ N. Při tomto posuvu má největší naměřenou hodnotu $F = 1392$ VBD 2. Mezi VBD 4 a VBD 2 se jedná zhruba o 6,5 % rozdíl v silovém zatížení.

Při posuvu $f_{ot} = 0,6$ mm/ot se jako nejlepší destička jeví VBD 3. Naměřená hodnota u této destičky je 2054 N. Což je zhruba o 7 % menší silové zatížení než u VBD 2, u níž byla naměřená největší hodnota síly obrábění $F = 2206$ N.

Z ekonomického hlediska bohužel nemohu poskytnout žádné zhodnocení. Z důvodu obchodního tajemství mi nebyli poskytnuty ceny jednotlivých destiček.



Obrázek 5.1 - Graf srovnání celkové síly obrábění.

6 Závěr

Řezné síly jsou důležité pro přehled o mechanickém namáhání soustavy S-N-O, její pevnosti, tuhosti a stabilitě řezného procesu. Znalost těchto silových poměrů je důležitá kvůli životnosti a trvanlivosti nástroje, hodnocení obrobiteľnosti materiálu a také kvůli jejich vlivu na integritu obrobeného povrchu. Na velikost řezných sil má vliv řezná rychlost, hloubka řezu, velikost posuvu, geometrie břitu, stav otupení břitu, řezné prostředí i pevnost a tvrdost obráběného materiálu.

Bakalářská práce se zabývala měřením řezných sil u negativních vyměnitelných břitových destiček od společnosti Dormer Pramet s.r.o. K měření byl použit třísloužkový univerzální dynamometr KISTLER 9129AA a obráběcí stroj s označením S80i / 1000 od společnosti Kovosvit Mas, a.s. Naměřené hodnoty byly vyhodnocovány pomocí softwaru DynoWare a následně byla vypočtena celková síla obrábění. Řezné síly vyměnitelných břitových destiček byly měřeny při obrábění oceli ČSN 12 050 za předem stanovených řezných podmínek. Pro první měření byl stanovený posuv 0,2 mm/ot. Pro druhé měření se posuv změnil na 0,4 mm/ot a poslední měření probíhalo za nastaveného posuvu 0,6 mm/ot. Měření probíhalo v prostorách firmy Dormer Pramet s.r.o.

Ze získaných výsledků zpracovaných do tabulky bylo provedeno srovnání jednotlivých složek sil u všech typů VBD v podobě grafů. Experimentem se vybrali destičky s nejlepšími vlastnostmi za daných posuvů. Při posuvu 0,6 mm/ot měla nejmenší silové zatížení VBD 3 - DNMX 150608W-M3. Při zbylých dvou posuvech měla nejmenší silové zatížení VBD 4 DNMX 150608-WMX.

Poděkování

Tímto bych chtěl mnohokrát poděkovat společnosti Dormer Pramet s.r.o., za umožnění vypracování této bakalářské práce, především panu Ing. Romanu Maršíčkovi za jeho ochotu a vstřícný přístup při společných konzultacích.

Poděkování patří také Ing. Tomáši Zlámalovi za jeho čas a ochotu při konzultacích.

Na závěr patří mé největší poděkování panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za jeho vedení a ochotný přístup při vypracovávání této práce.

Seznam použité literatury:

- 1) *Interní materiály*, Dormer Pramet.. 2019
- 2) HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. IBSN 978-80-254-2250-2.
- 3) *Řezné materiály současnosti*, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
- 4) HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství - VUT v Brně, 2006[cit. 2019-04-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- 5) *Základní rozdělení slinutých karbidů dle ISO* | Technologie strojního obrábění kovů. Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů [online]. [cit.2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-slinutych-karbidu-dle-iso/>
- 6) *Výroba VBD a druhy povlaků*. Innotool – příručka obrábění. [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_331.pdf
- 7) SKOTNICOVÁ, K; KURSA, M. *Prášková metalurgie*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2013. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskova-metalurgie/Skotnicova_Praskova-metalurgie.pdf
- 8) ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online]. Copyright ©D [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO1cast.pdf
- 9) KANTAR, F. *PVD povlaky nové generace*. Bakalářská práce. VUT – Brno 2015
- 10) *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*, MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/upgrade-materialu-pro-obrabeni.html>
- 11) FOLTÝN, M. *Povlakované slinuté karbidy*. Bakalářská práce. VUT – Brno 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6370

- 12) ÚSTAV FYZIKY. *Metody depozice povlaků – CVD* [online]. Studijní opory. ČVUT FS, poslední úpravy 2012-11-04 [cit. 2019-05-11].
Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf.
- 13) *Rozdělení a označení ocelí* [online]. [cit. 2019-05-11]
Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf
- 14) 12 050.3 . *Nástrojová ocel – Lentus*, spol. s r.o. [online]. Copyright © 2019 LENTUS spol.s r.o., vytvořila eBRÁNA s.r.o. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.lentus-ocel.cz/12-0503>
- 15) ČEP, R.; PETRŮ, J. *Úvod do teorie obrábění. Tvorba a tvarování třísky*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013. s. 33 ISBN 978-80-248-3013-1.
- 16) ZLÁMAL, T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Disertační práce. Ostrava : VŠB-TU Ostrava 2015.
- 17) BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014. s. 178. ISBN 978-80-248-3522-8.
- 18) BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
- 19) *Měření složek síly řezání* [online]. [cit.2019-05-13].
Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- 20) ŠAJGALÍK, M. *Štúdium technologických charakteristik v zóne rezania*. Doktorandská dizertačná práca. Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žilíně. Žilina 2012
- 21) ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80- 248-1505-3.
- 22) KOCMAN, K.; PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. CERM Brno, 2003, s. 271, ISBN 80-214-1996-2.
- 23) MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985.
- 24) *Přímé a nepřímé měření sil a momentů* [online]. [cit.2019-05-15].
Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf